BIOLOGÍA
Nueva hipótesis sobre el origen de la vida

FÍSICA
Hacia la computación de energía cero

MEDIOAMBIENTE
Urbanismo para ciudades sostenibles

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2017 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de Scientific American

LOS ORÍGENES DE CRISPR

La técnica que está revolucionando la edición genética

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
OCTUBRE 2017 N.º 493 LOS ORÍGENES DE CRISPR | COMPUTACIÓN DE ENERGÍA CERO | URBANISMO SOSTENIBLE



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Octubre 2017, Número 493

ARTÍCULOS

MICROBIOLOGÍA

20 El descubrimiento del sistema CRISPR-Cas
Décadas de investigación básica sobre la biología de los procariotas han propiciado el hallazgo de un mecanismo microbiano de inmunidad adquirida. Sus aplicaciones como herramienta de edición genética parecen no tener límite. *Por Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros*

QUÍMICA

30 Fuentes de vida
El océano profundo se consideraba el escenario donde se originó la vida. Sin embargo, nuevos indicios apuntan hacia zonas volcánicas terrestres activas.
Por Martin J. Van Kranendonk, David W. Deamer y Tara Djokic

PSICOLOGÍA

38 Hablar consigo mismo
El estudio de las conversaciones que la gente mantiene para sus adentros abre una ventana a los entresijos de la mente. *Por Charles Fernyhough*

CONSERVACIÓN

44 Desplazar a las especies en peligro
A fin de salvar las especies amenazadas por el cambio climático, hay quien plantea su traslado a zonas nuevas, una propuesta no exenta de riesgo.
Por Richard Conniff

INFORME ESPECIAL: CIUDADES SOSTENIBLES

56 Urbanismo sostenible
Las ciudades podrían mejorar la vida de sus habitantes y la salud del planeta si contasen con una gestión adecuada de los recursos energéticos, hídricos, alimentarios y minerales.
Por William McDonough

60 Aprovechar la basura
Diseñar ciudades sostenibles exigirá reconvertir los residuos en materias primas.
Por Michael E. Webber

66 La movilidad del futuro
Una red móvil de cruces de tráfico inteligentes y vehículos equipados con sensores transformará nuestros desplazamientos por las ciudades.
Por Carlo Ratti y Assaf Biderman

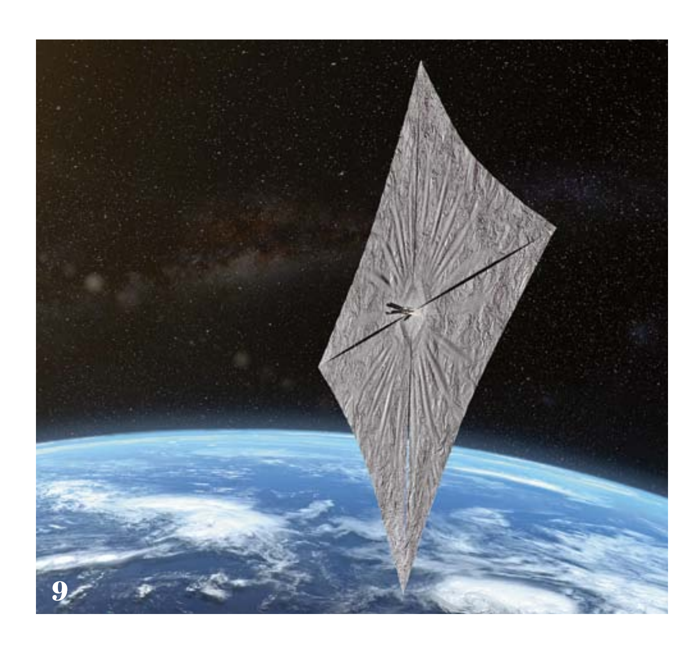
FÍSICA

72 Hacia la computación de energía cero
Un experimento ha demostrado la posibilidad de construir un dispositivo de cálculo que funcione con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.
Por Miquel López Suárez, Igor Neri y Luca Gammaitoni

SEGURIDAD

80 La nueva amenaza del carbunco
Recientes descubrimientos sobre un antiguo accidente demuestran lo mortíferas que pueden ser las armas biológicas. *Por Paul S. Keim, David H. Walker y Raymond A. Zilinskas*









INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Prospecciones espaciales. Un felino temeroso. Nuestro pasado está escrito en la Luna. Compromisos genéticos. Baterías mejoradas. Naves arrastradas por la luz del Sol. Redistribución nuclear. Fósiles gigantes.

11 Agenda

12 Panorama
Edición genética de embriones humanos. *Por Nerges Winblad y Fredrik Lanner*
Materiales reconfigurables inspirados en la papiroflexia. *Por Jamie Paik*
Comer hasta desecarnos. *Por Maite M. Aldaya*

50 De cerca
Equinodermos con visión. *Por Samuel Zamora*

52 Historia de la ciencia
Pasado en construcción. *Por Xavier Roqué*

54 Foro científico
El derecho a la libertad cognitiva.
Por Marcello Ienca

55 Ciencia y gastronomía
Umami. *Por Pere Castells*

86 Curiosidades de la física
Insectos sobre el agua.
Por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

88 Juegos matemáticos
El problema del cuadrado inscrito en la curva.
Por Bartolo Luque

92 Libros
CRISPR: la pugna por la narrativa.
Por Nathaniel Comfort
Antes de la ciencia. *Por Luis Alonso*
El descubrimiento de las ondas gravitacionales.
Por Luis Alonso

96 Hace...
50, 100 y 150 años.



EN PORTADA

La revolucionaria técnica CRISPR-Cas permite editar, o modificar, el genoma con gran precisión y eficacia. Su desarrollo ha sido posible gracias al descubrimiento del sistema de defensa que presentan bacterias y arqueas contra los virus, un hallazgo al que han contribuido de forma fundamental los pioneros trabajos de Francisco J. M. Mojica, de la Universidad de Alicante, y sus colaboradores. Ilustración de age fotostock/Science Photo Library/EQUINOX GRAPHICS



redaccion@investigacionyciencia.es



Abril de 2017

CALORÍAS Y EJERCICIO FÍSICO

En «La paradoja del ejercicio físico» [Investigación y Ciencia, abril de 2017], Herman Pontzer sostiene que un mayor nivel de actividad física no basta para tener bajo control el peso corporal. A lo largo del artículo, el autor menciona varios estudios que explican la manera en que el cuerpo humano quema las calorías y que permiten entender cómo funciona el proceso.

No obstante, en uno de esos estudios se afirma que las personas que no practican ninguna actividad física consumen, de media, unas 200 kilocalorías menos que quienes presentan una actividad moderada. Una diferencia de 200 kilocalorías al día vendría a traducirse en unos 9 kilogramos anuales. Año tras año, la diferencia acumulada puede llegar a ser abrumadora.

Ann Azevedo
Tolland, Connecticut

Se dice que los ciclistas que participan en el Tour de Francia ingieren más de 5000 kilocalorías diarias. Según el artículo de Pontzer, semejante cantidad sería a todas luces excesiva. Si es así, ¿por qué lo hacen? ¿Y por qué no engordan?

Walter Bräu

Responde Pontzer: *Con respecto a la observación de Azevedo, una diferencia de 200 kilocalorías al día sí que afectaría al peso. No obstante, lo que vemos al examinar los distintos estudios es que los individuos que queman más calorías al día no son en absoluto menos propensos a engordar que aquellos que gastan menos. De alguna manera, nuestro cuerpo realiza un trabajo sorprendente a la hora de acompasar el consumo energético y la ingesta de alimentos. Pero, dado que el gasto energético diario suele ser difícil de modificar, es mucho más probable que acabemos comiendo de más que quemando menos calorías. Por tanto, prevenir la obesidad probablemente requiera que nos centremos más en la dieta.*

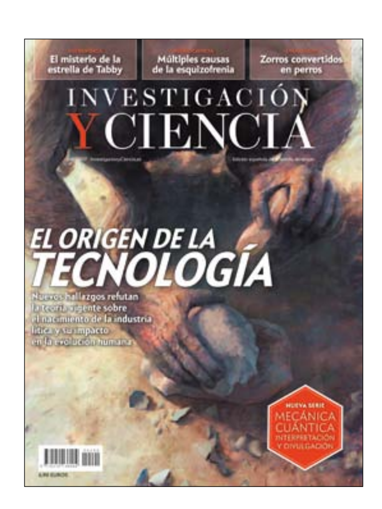
En cuanto a la pregunta de Bräu, los acontecimientos como el Tour de Francia, los campeonatos profesionales de triatlón o algunas maratones son demasiado cortos y extremos para que el cuerpo pueda adaptarse a ellos. Los atletas que participan en tales competiciones ingieren cantidades prodigiosas de comida y a menudo incluso pierden peso, ya que su cuerpo puede llegar a quemar más de 5000 kilocalorías al día. Semejantes proezas superan con mucho la rutina diaria incluso de las personas más activas y, como consecuencia, no son realmente sostenibles a largo plazo. Los corredores suelen necesitar largos períodos para recuperarse. Y las exigencias metabólicas derivadas de dichas actividades puede que sean una de las razones por las que algunos atletas consumen sustancias que mejoran su rendimiento y que les ayudan a soportar semejante gasto energético.

DISTOPÍA TECNOLÓGICA

En el artículo «La técnica y el proceso de humanización» [Investigación y Ciencia, julio de 2017], José Sanmartín Esplugues dice que resulta preocupante que, en nuestro afán de poder y de dominar la naturaleza, en estos momentos sintamos la tentación de escuchar a los posthumanistas e intentemos convertirnos en seres imperecederos que venzan la última servidumbre que nos impone la naturaleza: la muerte y la desaparición. El autor considera ese intento propio de los delirios de aquellos que creen que no cabe poner límites a los avances técnicos y, frente a ello, propugna una reflexión sobre la técnica que nos lleve a utilizarla para el bien humano integral y para garantizar una cultura al servicio de la dignidad humana.

No pretendo discutir acerca de qué es el bien humano integral ni acerca de qué es lo acorde con la dignidad humana. Pero sí me gustaría hacer notar al autor que son precisamente la técnica y nuestro afán de poder los vectores que en estos momentos han colocado a la humanidad y a la naturaleza en las puertas de la extinción, evento que probablemente suceda antes de que se logre diseñar un procedimiento técnico de inmortalidad artificial. Por tanto, el verdadero problema ético que suscita la técnica como resultado del humano empeño de domeñar el mundo no es que nos confunda el concepto de qué sea la dignidad del hombre, sino que ella, a la larga, acarreará la destrucción de la cultura y del sentido moral.

José Enrique García Pascua
Torrecaballeros, Segovia



Julio de 2017

Erratum corrige

En el artículo **La conducta animal en un mar cada vez más ácido**, de Danielle L. Dixson [Investigación y Ciencia, agosto de 2017], se habla erróneamente del «neurotransmisor $GABA_A$»; en realidad, debería hacerse referencia al «receptor $GABA_A$» (uno de los receptores del neurotransmisor GABA).

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LA NAVE DE LA NASA *OSIRIS-REx* en el asteroide Bennu, rico en agua (*recreación artística*). La misión pretende traer una muestra de roca a la Tierra para su estudio científico.

POLÍTICA

Prospecciones espaciales

La minería en asteroides pone a prueba los límites del derecho internacional

El Tratado del Espacio Exterior (TEE) cumple 50 años este mes de octubre. El acuerdo fundacional de 1967 establece que el espacio pertenece «a toda la humanidad» y prohíbe colonizar objetos celestes o usarlos con fines militares a los casi cien Estados que lo han ratificado o se han adherido a él. Ahora, el acuerdo está tomando una renovada importancia ante una posibilidad que ya asoma en el horizonte: la minería en asteroides, algo apenas imaginable cuando se redactó el tratado pero que hoy se ha convertido en una realidad cercana.

Dos compañías estadounidenses, Deep Space Industries y Planetary Resources, ya están trabajando en ello. Su meta consiste en suministrar desde el espacio recursos como agua, combustible para cohetes y materiales de construcción, cuyo transporte desde la Tierra resulta prohibitivo. Ambas empresas afirman que tienen planeado lanzar naves prospectoras a asteroides a finales de 2020, si bien piensan ensayar en órbitas terrestres bajas este mismo año. Su ambicioso calendario incluye operaciones de minería a gran escala para la segunda mitad de la década de 2020.

John Lewis, científico jefe de Deep Space Industries, explica que el recurso que presenta menos dificultades es el agua, la cual puede convertirse en hidrógeno y oxígeno para combustible. Esta sustancia esencial para la vida da cuenta de hasta el 10 por ciento de la masa de los asteroides, donde se encuentra apresada en minerales similares a la mica terrestre. No obstante, es posible extraerla junto a otras sustancias volátiles, como el nitrógeno o compuestos de azufre, cociendo el material en un horno solar. La adaptación de las técnicas de minería terrestre posibilitaría asimismo obtener hierro de los asteroides.

Para ello, sin embargo, una compañía tendría primero que sacar la materia prima de allí, algo que países

como Rusia, Brasil o Bélgica ven como una violación del TEE. Aunque este no menciona explícitamente la minería, una de sus cláusulas principales prohíbe la «apropiación nacional» de los cuerpos celestes. Puede argumentarse que ese principio debería también aplicarse a la extracción de recursos, aunque lo cierto es que el acuerdo «no ofrece mucha guía al respecto», reconoce Frans von der Dunk, profesor de derecho espacial de la Universidad de Nebraska-Lincoln.

Von der Dunk añade que quienes proponen la explotación minera de los asteroides equiparan su condición a la de «bien comunal mundial» que impera en mar abierto: ningún Estado puede colonizar el Atlántico, pero cualquiera puede pescar en él. Brian Israel, asesor legal de Planetary Resources, y otros expertos defienden que, de igual modo, usar material extraído de un asteroide no constituiría una apropiación.

Varios Gobiernos han abrazado esa interpretación. El Departamento de Estado de EE.UU. viene sosteniendo desde hace décadas que el TEE sí permite la explotación comercial. En 2015, el Gobierno del país fue más allá cuando el entonces presidente, Barack Obama, firmó una ley que reconocía a los ciudadanos estadounidenses los derechos de propiedad de los recursos procedentes de asteroides, al tiempo que autorizaba un programa de concesión de licencias para su explotación minera. Luxemburgo, que maniobra para convertirse en un nodo mundial de la minería espacial, aprobó hace poco una ley parecida. Brian Israel sostiene que, al establecer regímenes de licencias nacionales, se satisface el requisito del TEE según el cual los Estados garantizarán que los ciudadanos se atengan al tratado.

Pero no todo el mundo es tan optimista. En otros territorios considerados bienes mundiales, como la Antártida, los criterios para la extracción se rigen por tratados mucho más detallados, señala Joanne Gabrynowicz, directora emérita del *Journal of Space Law*. Von der Dunk añade que, a falta de ese tipo de clarificaciones, quienes se oponen a la minería espacial unilateral defienden que «si el espacio exterior es de todos, los recursos también». Por tanto, antes de que los entes privados puedan emprender explotaciones mineras, los países deberán acordar la creación de un organismo para la concesión internacional de licencias y el reparto de los beneficios. Ese argumento es especialmente bienvenido entre los países en desarrollo, quienes ven un paralelismo con la historia colonial, llena de invasiones de territorios y saqueo de recursos, añade Gabrynowicz.



EL COHETE *ATLAS V* de United Launch Alliance, con la nave *OSIRIS-REx* a bordo, durante su despegue en Cabo Cañaveral, en septiembre de 2016.

No obstante, las perspectivas de un nuevo marco internacional se antojan oscuras. El Acuerdo Lunar, un intento previo de explicitar tales reglas, sigue sin ser ratificado por ningún país de importancia aeroespacial ante el miedo de que una cláusula obligue a repartir los beneficios. Y el apetito mundial por nuevos tratados parece escaso. Von der Dunk espera que, en los próximos años, el resto del mundo acabe adoptando un punto de vista similar al de Estados Unidos. Pero Nicolas Lee, investigador de Stanford, augura que no ocurrirá nada «hasta que una empresa realmente vaya allí y haga algo».

Puede que ese día esté más cerca de lo que parece. Lindy Elkins-Tanton, investigadora principal de una futura misión de la NASA al asteroide metálico Psique [*véase* «La formación de los planetas del sistema solar», por Lindy Elkins-Tanton; Investigación y Ciencia, febrero de 2017], afirma que otras misiones previas ya han demostrado que la tecnología necesaria para acercarse a un asteroide —si no para aterrizar en él— ya está lista. Y la nave de la NASA *OSIRIS-REx* ya está en ruta hacia Bennu, un asteroide rico en agua del que pretende traer una muestra de roca para su estudio científico. Dante Lauretta, investigador principal de la misión y asesor de Planetary Resources, cree que la tecnología empleada en *OSIRIS-REx* se trasladará casi por completo a proyectos comerciales [*véase* «Siete años de misión para reunir 60 gramos de asteroide», por Dante Lauretta; Investigación y Ciencia, septiembre de 2016]. Al mismo tiempo, los costes de las misiones espaciales están cayendo en picado gracias a la boyante industria espacial privada.

Para Lauretta, que compara la fase actual a «ir levantando piedras para ver dónde están las pepitas de oro», las técnicas de procesamiento de materiales en el espacio aún no están listas. Pero Lee no tiene dudas de que alguien pondrá en marcha una explotación minera antes o después. Cuando eso ocurra, las empresas y los reguladores tendrán que encontrar un equilibrio saludable entre múltiples intereses. «La exploración no siempre ha sido algo positivo», recuerda Elkins-Tanton. «Ahora tenemos una oportunidad de hacerlo mejor.»

—Jesse Dunietz

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE LA NASA, LABORATORIO LUNAR Y PLANETARIO, UNIVERSIDAD DE ARIZONA Y LOCKHEED MARTIN; ESTA PÁGINA: CORTESÍA DE LA NASA Y JOEL KOWSKY



DON JOHNSTON, GETTY IMAGES

CONSERVACIÓN

Un felino temeroso

Los pumas reaccionan como presas en presencia de los humanos

El hombre extermina los grandes carnívoros (categoría que engloba a lobos, osos, leones, tigres y pumas) a un ritmo nueve veces mayor que su tasa natural de mortalidad. Tal vez no sean presas en el sentido ordinario del término, pero nuevas investigaciones revelan que algunos de los mayores carnívoros del planeta están respondiendo a la presión humana de un modo que recuerda a cómo se comportan las presas ante los depredadores. Los biólogos del Proyecto Puma de Santa Cruz, investigación que en estos momentos se lleva a cabo en las sierras de la costa central de California, han descrito que incluso el formidable puma muestra su lado temeroso cuando la gente ronda cerca.

En un estudio reciente, siguieron a 17 pumas provistos de collares con GPS hasta los puntos donde habían dado muerte a ciervos. Una vez que los felinos abandonaban el lugar, la ecóloga Justine A. Smith, ahora en la Universidad de California en Berkeley, y su equipo instalaban cámaras accionadas por movimiento sobre los cadáveres de las presas. Cuando el carnívoro regresaba para volver a cebarse con los restos, las cámaras ponían en marcha unos altavoces instalados en las cercanías que emitían grabaciones consistentes en el canto de las ranas o en voces humanas.

Casi siempre los felinos huían de inmediato si escuchaban las segundas; muchos no volvieron a pisar el lugar o tardaron largo tiempo en regresar. En cambio, si oían a los batracios solo huían o interrumpían su comida en raras ocasiones. Asimismo, durante las 24 horas siguientes a su encuentro con las voces humanas dedicaron menos de la mitad de tiempo a comer que si habían oído el canto de las ranas, ha descrito el equipo este año en *Proceedings of the Royal Society B*.

La presencia humana en tales situaciones tiene consecuencias de mayor alcance. Un estudio precedente constató que los pumas de Santa Cruz que vivían cerca de zonas habitadas mataban un 36 por ciento más de ciervos que los de otros lugares menos poblados. El nuevo hallazgo podría ofrecer una explicación: si abandonan definitivamente sus presas antes de haberlas devorado enteras, están obligados a cazar más para compensar. Y menos ciervos significa más vegetación intacta, según Chris Darimont, profesora de ciencia de la conservación en la Universidad de Victoria, en la Columbia Británica, que no ha participado en el estudio. En definitiva, el miedo al hombre podría estar alterando toda la cadena trófica.

«El ser humano es el principal causante de muertes para los pumas de esta población, aunque [los felinos] no sean cazados [legalmente]» como alimento o trofeo de caza, afirma Smith. Muchos caen víctimas de los furtivos, son atropellados por vehículos o son abatidos por los organismos oficiales para proteger los rebaños de ganado. «Así que tienen buenas razones para temernos», añade. Darimont predice que otros grandes carnívoros podrían mostrar actitudes similares dado que el hombre se ha convertido en el superdepredador por antonomasia del planeta, aunque a menudo no devoremos lo que abatimos. «Preveo que se convierta en algo habitual, puesto que el depredador humano da caza a todos los vertebrados de talla mediana y grande del planeta. Y a un ritmo alarmante», sentencia.

—Jason G. Goldman

CIENCIAS DE LA TIERRA

Nuestro pasado está escrito en la Luna

El estudio del suelo lunar podría ofrecer pistas sobre la atmósfera y la vida de la Tierra primitiva

Una nave espacial japonesa en órbita alrededor de la Luna efectuó hace poco un hallazgo sorprendente: oxígeno procedente de la Tierra. Los expertos creen que el descubrimiento podría ofrecer un registro histórico de los cambios experimentados por la atmósfera primitiva de la Tierra.

Existen pocos indicios fiables sobre el pasado remoto de la atmósfera y la superficie terrestres, ya que la actividad geológica ha ido borrando los detalles a lo largo del tiempo. De igual modo, tampoco se conservan las pistas que podrían haber proporcionado aquellos meteoritos que se formaron hacia la misma época que la Tierra y a partir de un material similar. En este contexto, el descubrimiento de oxígeno terrestre en la Luna abre una nueva vía para acceder a los primeros 2000 millones de años de la historia de nuestro planeta.

La Luna es bombardeada constantemente por el viento solar, la corriente de partículas dotadas de carga eléctrica procedentes del Sol. Sin embargo, durante unos cinco días al mes, nuestra vecina se ve protegida por la magnetosfera terrestre. Ese lapso abre una ventana para que los iones de oxígeno provenientes de la Tierra, más lentos, lleguen a la Luna. Se piensa que esos iones, los cuales han sido detectados por la nave *SELENE* (más conocida como *Kaguya*), fueron moviéndose a lo largo del tiempo geológico desde las regiones exteriores de nuestra atmósfera hasta quedar inmersos en el regolito lunar, la capa de suelo y roca sin aglomerar que recubre nuestro satélite. Un equipo dirigido por Kentaro Terada, planetólogo de la Universidad de Osaka, publicó el resultado este año en *Nature Astronomy*. «Nuestro hallazgo se relaciona de manera directa con el transporte de iones desde la atmósfera terrestre hasta la Luna», explica Terada. Una vez allí, los iones podrían haber permanecido en el suelo durante miles de millones de años.

El resultado ha emocionado a aquellos científicos interesados en la transición que coincidió con el comienzo de la fotosíntesis en microorganismos simples, las formas de vida primigenias de la Tierra. Hace unos 2450 millones de años, la atmósfera terrestre se llenó de oxígeno durante un misterioso episodio conocido como la Gran Oxigenación. ¿Puede que la Luna actual contenga parte del oxígeno atmosférico producido entonces? Si fuese posible recoger y analizar muestras del oxígeno terrestre inmerso en el suelo lunar, eso permitiría investigar la evolución de nuestra atmósfera a lo largo del tiempo geológico.

Además de esos iones atrapados, la Luna podría albergar todo tipo de información relativa a la evolución de la Tierra primigenia. «En principio, la Luna debería tener una notable colección de detritus procedentes de su planeta hermano», señala Caleb Scharf, astrobiólogo de la Universidad de Columbia que no participó la investigación. «No es inconcebible que haya organismos fósiles en meteoritos terrestres que hoy estén sobre la superficie lunar.»

—Saswato R. Das

EVOLUCIÓN

Compromisos genéticos

Los microbios adoptan soluciones intermedias para adquirir los rasgos deseables

Si quiere sobrevivir a los ambientes hostiles, todo organismo ha de adquirir nuevos rasgos. Pero las normas de la evolución parecen limitar el número de características que es posible optimizar a la vez. En un nuevo estudio, sus artífices afirman haber hallado bacterias que adoptan un compromiso genético: los microbios en cuestión podían adquirir uno solo de dos nuevos rasgos y seleccionar el más adecuado para prosperar en ciertas condiciones.

Los resultados podrían aportar un modelo para estudiar la adquisición de la resistencia a los antibióticos por parte de los microbios infecciosos. «Queremos entender las reglas, si las hay, que rigen la adaptación de los microorganismos», afirma el autor del estudio Seppe Kuehn, biofísico de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. «Si lo lográsemos, quizá tendríamos la oportunidad de conseguir grandes avances en el tratamiento.»

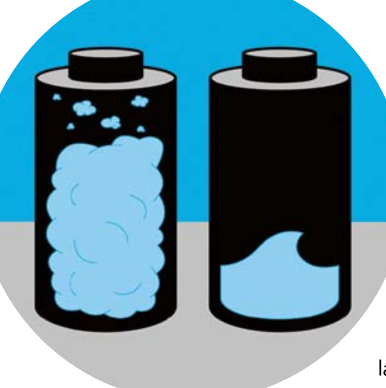
David Fraebel, estudiante graduado del laboratorio de Kuehn, cultivó *Escherichia coli* en sendos medios de crecimiento rico y pobre en nutrientes y midió la rapidez de pro-



pagación de las bacterias. Un modelo matemático predijo que las que más proliferarían serían las que aunaran dos caracteres: la velocidad de desplazamiento en el medio líquido y el ritmo de crecimiento. Pero, en lugar de ello, escogieron uno solo. En el medio con abundantes nutrientes, las bacterias que migraron más lejos optaron por la velocidad de desplazamiento. En cambio, en el medio oligotrófico, pobre en nutrientes, predominaron las más prolíficos.

Al comparar las secuencias de ADN de estos microbios más evolucionados con las de sus ascendientes, Fraebel descubrió que los más veloces habían adquirido una mutación, en tanto que los más prolíficos habían adoptado otra. Ninguna de las bacterias supervivientes poseía ambas.

El hallazgo, relatado en *eLife*, sugiere que las bacterias más aptas escogieron una senda evolutiva u otra, explica Kuehn. Tales compromisos podrían ser una de las múltiples herramientas genéticas que les permiten sobrevivir cuando afrontan problemas ambientales. —*Michael Waldholz*



INGENIERÍA

Baterías mejoradas

Los electrolitos gaseosos podrían ser más seguros y duraderos que los líquidos que se usan ahora

Algunos poseedores del teléfono inteligente Samsung Galaxy Note7 aprendieron el año pasado a las malas que las baterías de litio, las que llevan tantos aparatos electrónicos de consumo, pueden ser inflamables y hasta explosivas. Funcionan por lo común con electrolitos líquidos, es decir, soluciones de sales en solventes que son líquidos en condiciones estándar. En ellos los iones fluyen entre electrodos separados por una membrana porosa y se crea así una corriente. Pero el fluido es propenso a formar dendritas, fibras microscópicas de litio que pueden hacer que las baterías sufran un cortocircuito y se calienten con rapidez. Los estudios indican ahora que con electrolitos a base de un solvente gaseoso (en condiciones estándar, aunque estaría licuado en la batería), se podrían tener baterías más potentes y seguras.

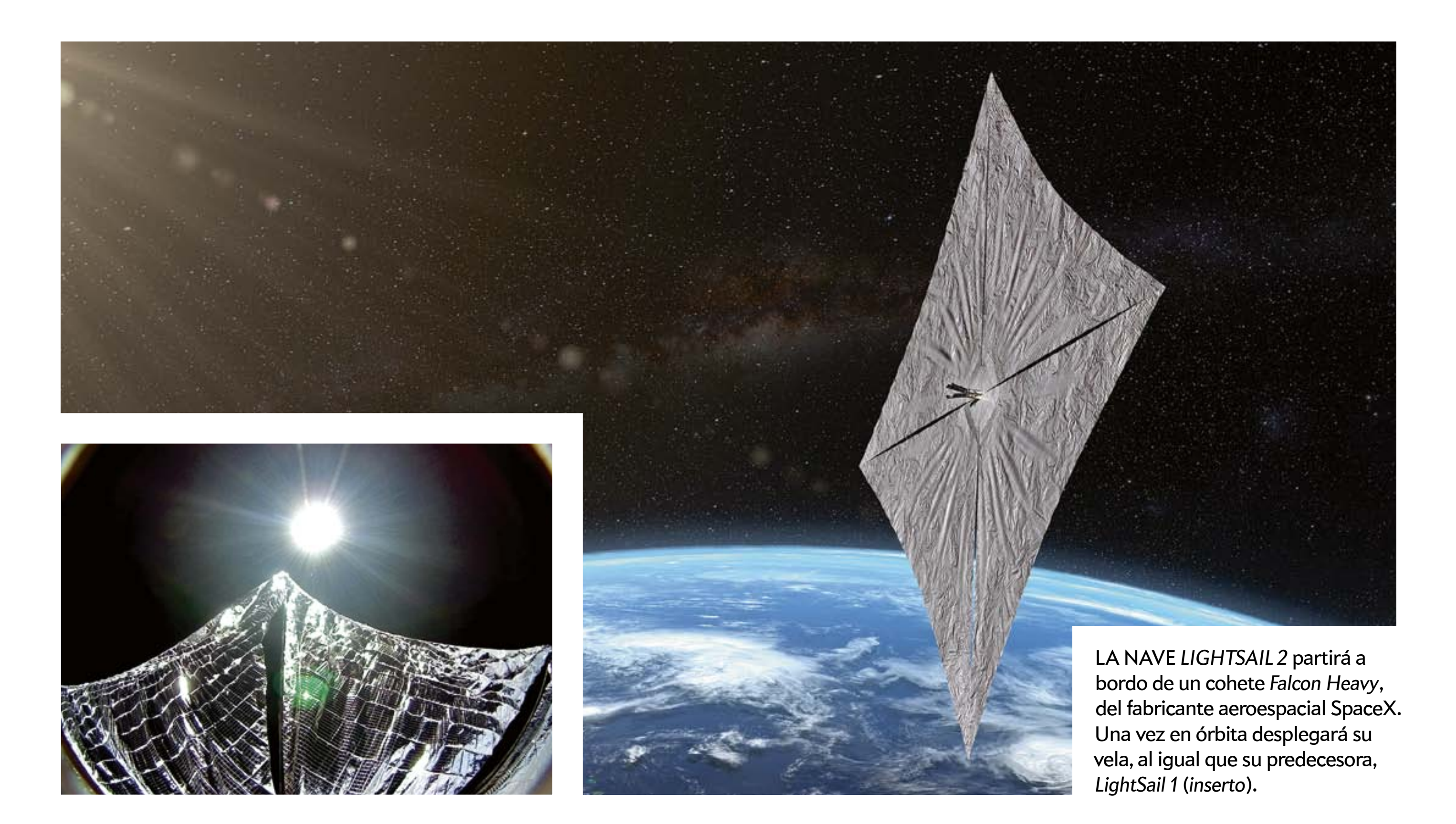
Cyrus Rustomji, investigador posdoctoral de la Universidad de California en San Diego, y sus colaboradores han ensayado recientemente electrolitos en los que el solvente es gas fluorometano licuado, que puede absorber sales de litio tan bien como sus análogos líquidos más comunes. Tras haberse cargado y descargado por completo 400 veces, la batería experimental mantenía la carga casi tanto tiempo como cuando era nueva; el tiempo que dura una batería ordinaria de litio no suele ser ni un 20 por ciento de ese. Además, la batería de gas condensado no genera dendritas. Los resultados se han publicado hace unos meses en *Science*.

Si se pincha una batería estándar de litio (y la membrana que separa los electrodos se perfora), los electrodos pueden entrar en contacto y cortocircuitarse. La batería se calienta entonces en presencia de su electrolito reactivo de litio y es posible que se prenda fuego (lo que se agrava con la entrada de oxígeno desde el exterior). Pero el fluorometano solo se licúa bajo presión, así que si las nuevas baterías se pinchan, la presión se libera, el líquido revierte a la forma gaseosa y el gas escapa, como explica Rustomji, autor principal del artículo de *Science*. Al no haber un electrolito que cree una avalancha de movimiento iónico, no se produce fuego, comenta.

Las nuevas baterías funcionan bien a temperaturas de solo 60 grados bajo cero, al contrario que las baterías estándar de litio, así que, según Rustomji, podrían ser la fuente de energía de los aparatos a bordo de drones que volaran a gran altitud y de vehículos espaciales de largo recorrido.

Donald Sadoway, profesor de química de materiales del Instituto de Tecnología de Massachusetts que no participó en el estudio, sostiene que la nueva idea nos abre los ojos a una clase de líquidos que no está bien estudiada. Pero, añade, los investigadores han de asegurarse de que el calor sobrante no hará que el gas licuado de las baterías se expanda rápidamente y produzca un incremento peligroso de la presión. —*Matthew Sedacca*

TED HOROWITZ, GETTY IMAGES (*cultivo*); THOMAS FUCHS (*baterías*)



LA NAVE *LIGHTSAIL 2* partirá a bordo de un cohete *Falcon Heavy*, del fabricante aeroespacial SpaceX. Una vez en órbita desplegará su vela, al igual que su predecesora, *LightSail 1* (*inserto*).

CORTESÍA DE JOSH SPRADLING/SOCIEDAD PLANETARIA; CORTESÍA DE LA SOCIEDAD PLANETARIA (*inserto*)

TECNOLOGÍA ESPACIAL

Naves arrastradas por la luz del Sol

Un proyecto que pondrá a prueba el concepto de vela solar podría abrir el camino a una nueva clase de misiones espaciales

En el espacio no hay gasolineras. Por ello, y con el objetivo de enviar naves asequibles y ligeras en misiones de largo recorrido, la NASA y varias empresas aeroespaciales están explorando cómo aprovechar la luz del Sol. Las opciones incluyen las llamadas «velas solares» y una nueva generación de propulsores solares eléctricos. En los próximos meses, el proyecto LightSail 2, costeado por el sector privado, lanzará una sonda del tamaño de una fiambrera que, una vez en órbita, desplegará una vela de Mylar (la película de poliéster BoPET) del tamaño de dos plazas de aparcamiento. Si todo funciona, la técnica podría impulsar naves hasta Marte y más allá.

Las velas solares no son cosa de ciencia ficción. En 2010, la sonda japonesa *IKAROS* demostró que la idea funcionaba durante una misión a Venus. Sus defensores argumentan que la tecnología que empleará LightSail 2 —con un presupuesto de 5,45 millones de dólares aportados por la Sociedad Planetaria, una organización sin ánimo de lucro— podría servir para que los llamados CubeSats, pequeños satélites de bajo coste, maniobrasen en órbita terrestre sin necesidad de combustible. Asimismo, los resultados de la misión podrían aprovecharse en el futuro Explorador de Asteroides Cercanos a la Tierra (NEA Scout), una misión de la NASA que empleará una vela solar y cuyo lanzamiento está previsto para 2019.

«El verdadero nicho [de las velas solares] son las cargas útiles muy pequeñas, de larga duración y que necesiten poco empuje», indica Les Johnson, experto del Centro de Vuelos Espaciales Marshall e investigador principal tecnológico de NEA Scout. El experto señala que la presión ejercida por la radiación solar (del orden de 10 micronewtons por metro cuadrado de vela en una órbita similar a la terrestre) puede acelerar una sonda pequeña; además, ladear la vela permite cambiar el rumbo de la nave, pues modifica el ángulo con el que la luz se refleja en ella. Eso resulta ideal para misiones baratas, con cargas útiles diminutas y que puedan tomarse su tiempo, como NEA Scout.

Con todo, la presión de la radiación disminuye con la distancia Sol, y al llegar a Júpiter la fuerza resultante es ya demasiado débil para impulsar la mayoría de las misiones. A pesar de ello, tanto Johnson como Jeffrey Sheehy, ingeniero jefe del Consejo de Tecnología Espacial para Misiones de la NASA, coinciden en que la técnica puede allanar el camino a misiones interestelares en las que potentes láseres acelerarían naves minúsculas hasta un décimo de la velocidad de la luz. Un proyecto privado, Breakthrough Starshot, se ha propuesto aplicar este principio para enviar sondas a Alfa Centauri, el sistema estelar más próximo a la Tierra, de aquí a unos veinte años [*véase* «Misión a Alfa Centauri», por Ann Finkbeiner; Investigación y Ciencia, mayo de 2017].

Sheehy explica que, velas aparte, la luz solar podría impulsar naves mucho mayores, robóticas o tripuladas, gracias a otro principio: la propulsión eléctrica solar. En este caso, los paneles solares suministrarían energía eléctrica a eficientes propulsores, los cuales convertirían gas en penachos de plasma que impelerían la nave. La NASA ya ha reclutado a empresas como Aerojet Rocketdyne y Ad Astra Rocket Company para aumentar la potencia generada. «Hoy podemos hacer volar sistemas de propulsión eléctrica de apenas unos kilovatios», señala Sheehy. «Lo que estamos intentando es llegar a las decenas de kilovatios como paso intermedio hacia los cientos de kilovatios.» —*Jeremy Hsu*

ENERGÍA

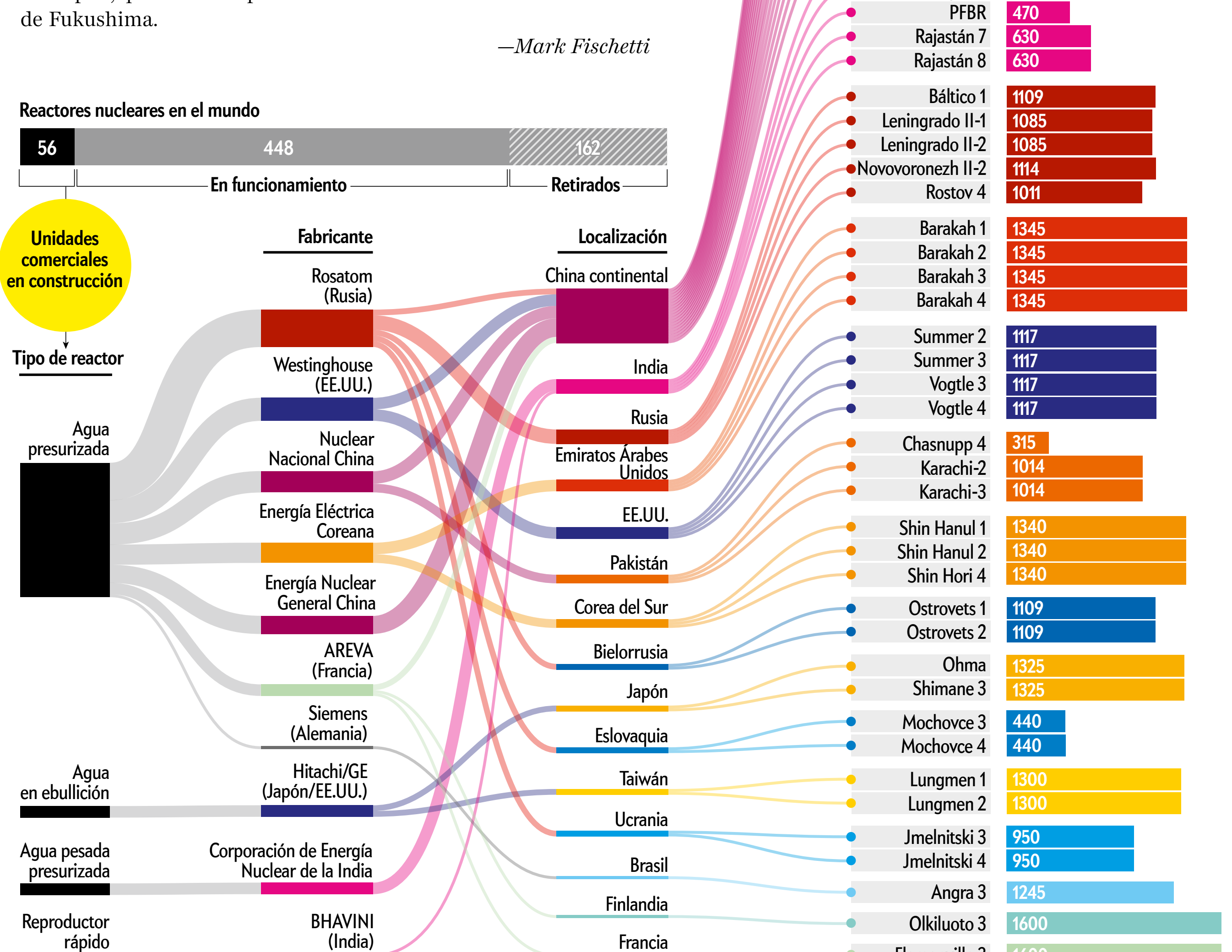
Redistribución nuclear

Mientras Occidente recula, Asia construye cada vez más reactores nucleares

La energía nuclear está de moda en Asia. China está construyendo 19 reactores, dos de los cuales se encontrarán entre los mayores jamás instalados; Rosatom, la compañía estatal rusa de ingeniería, está levantando 13 reactores en cinco países; la India está creando su propia cadena de suministro. Mientras tanto, EE.UU. ha anulado varios proyectos hasta dejar solo 4 reactores en construcción; la empresa Westinghouse, otrora líder mundial del sector, se declaró en quiebra el pasado mes de marzo. Francia, que durante años ha vivido felizmente de la energía nuclear, ha decidido recurrir a las renovables para cubrir la nueva demanda eléctrica. Y, para 2022, Alemania habrá clausurado todos sus reactores.

Si China sigue en esa línea, en diez años dispondrá de más capacidad nuclear que EE.UU., el actual líder. El Gobierno facilita a las compañías las licencias y la financiación, dos grandes obstáculos en Occidente. Y los cambios en el mercado podrían redefinir las alianzas: países como Emiratos Árabes Unidos ya están firmando acuerdos con los boyantes suministradores rusos y coreanos, en vez de con sus homólogos estadounidenses y europeos, de capa caída. La anomalía en Asia tal vez sea Japón, que frenó sus planes nucleares tras el desastroso accidente de Fukushima.

—Mark Fischetti



JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*); FUENTE: ASOCIACIÓN NUCLEAR MUNDIAL



INTERPRETACIÓN ARTÍSTICA de los rangeomorfos, organismos gigantes extintos, cuya forma recuerda a las frondas de un helecho.

PALEONTOLOGÍA

Fósiles gigantes

Los rangeomorfos pueden aportar pistas sobre los orígenes de la vida animal

Los paleontólogos desenterraron extraños especímenes en Terranova a inicios de la década pasada: gigantescos organismos con forma de frondas (hojas) de helecho, depositados en un antiquísimo lecho fosilizado. Los estudiosos ya conocían esas misteriosas criaturas extintas, llamadas rangeomorfos, cuya clasificación sigue suponiendo un quebradero de cabeza. Ahora creen que los fósiles de Terranova y sus iguales podrían ayudar a responder grandes incógnitas sobre la vida en la Tierra.

Los rangeomorfos se remontan al período Ediacarense, que abarca desde 635 hasta 541 millones de años de antigüedad. Dotados de cuerpos alargados como un tallo del que brotaban ramificaciones fractales y de consistencia blanda como las medusas, se cree que adquirieron dimensiones inéditas entre la fauna coetánea, hasta dos metros de largo. Tras su extinción, la Tierra presenció una explosión de diversidad zoológica durante el Cámbrico. «Los rangeomorfos son parte del contexto más amplio de lo que en aquel momento estaba sucediendo en la Tierra», afirma uno de los autores del estudio, Jennifer Hoyal Cuthill, especialista en paleobiología del Instituto de Tecnología de Tokio. Descubrir cómo alcanzaron semejante talla y diversidad podría aportar pistas para saber qué factores propiciaron su aparición, así como el modo en que las condiciones ambientales en el planeta —en proceso de cambio en aquella época— pudieron influir en la evolución de la vida.

Para entender mejor tales conexiones, Hoyal Cuthill y el paleontólogo de la Universidad de Cambridge Simon Conway Morris analizaron varios fósiles de rangeomorfos. Ambos sometieron a una microtomografía a un espécimen bien conservado de la especie *Avalofractus abaculus*, desenterrado en Terranova, con el fin de examinar su estructura tridimensional con todo detalle. También efectuaron mediciones fotográficas de otros dos especímenes con fines comparativos.

Examinaron diversos aspectos de los tallos y las ramas de los rangeomorfos fósiles y, mediante modelos matemáticos, analizaron la relación entre su superficie y su volumen. Los modelos, junto con el examen de los especímenes, revelaron que el tamaño y la forma parecían depender de la cantidad de nutrientes disponible, según han descrito los investigadores en fecha reciente en *Nature Ecology & Evolution*. Esto podría explicar por qué alcanzaron semejantes dimensiones durante un período en el que la geoquímica de la Tierra estaba cambiando.

Pero otros expertos vacilan a la hora de generalizar. «Es un hallazgo interesante que refuerza el creciente consenso de que los rangeomorfos alteraron su crecimiento en respuesta a los cambios del entorno», comenta Jack Matthews, investigador del Museo de Historia Natural de la Universidad de Oxford, ajeno al estudio. Pero tal vez sea prematuro hacer extensivo ese descubrimiento a todos los rangeomorfos.

Con todo, si la explicación resultara acertada, Hoyal Cuthill cree que podría revelar el nexo de unión que vincula esa sorprendente aparición en el registro fósil de organismos voluminosos con lo que estaba sucediendo en la Tierra. —*Annie Sneed*

REID PSALTIS *(rangeomorfos)*; CENTRO DE CULTURA CONTEMPORÁNEA *(Arca de Noé)*

AGENDA

CONFERENCIAS

3, 10, 17 y 31 de octubre
Ciclo: Lenguaje y cerebro
CosmoCaixa
Barcelona
agenda.obrasocial.lacaixa.es

24 de octubre
Otras Tierras y el origen de la vida
Dimitar D. Sasselov, Universidad Harvard
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es

EXPOSICIONES

Hasta el 6 de octubre
Grafeno «made in Granada»
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

Montañas: Entre el cielo y la tierra
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

A partir del 25 de octubre
Después del fin del mundo
Centro de Cultura Contemporánea
Barcelona
www.cccb.org



OTROS

5 de octubre — Observación astronómica
Viendo el negativo del cielo: El medio intergaláctico
Conferencia y observación de la Luna y Saturno
Alberto Fernández Soto,
Instituto de Física de Cantabria
Ciudad de las Artes y las Ciencias
Valencia
www.cac.es

7 y 29 de octubre — Espectáculo
Big Van: Científicos sobre ruedas
Organiza: CSIC
Miranda de Ebro (7 oct)
Nigrán (29 oct)
www.ciudadciencia.es

EN EMBRIONES HUMANOS formados por ocho células se ha comprobado que la técnica CRISPR-Cas elimina una mutación mortal.

BIOTECNOLOGÍA

Edición genética de embriones humanos

La técnica CRISPR-Cas se ha ensayado en el laboratorio para corregir una mutación causante de una enfermedad. Su aplicación durante la fecundación in vitro mejora la eficacia de la edición

NERGES WINBLAD Y FREDRIK LANNER

La capacidad para editar de manera selectiva determinadas regiones del genoma mediante la técnica CRISPR-Cas ha transformado numerosas áreas de la investigación biológica. Estos avances han planteado la cuestión de si en el futuro se llegará a utilizar esta técnica para tratar o prevenir enfermedades. De hecho, se están llevando a cabo ensayos clínicos sobre su empleo en células humanas, uno de los cuales explora la edición de células inmunitarias para tratar el cáncer. Y existe un debate sobre el posible uso de CRISPR-Cas para modificar el genoma humano en un individuo, un tema que genera multitud de cuestiones éticas y normativas. Pero ¿qué tipo de investigación científica adicional se necesitaría para que pudiera aplicarse la técnica en la práctica clínica?

Un equipo internacional de investigadores, dirigido por Shoukhrat Mitalipov, de la Universidad de Salud y Ciencia de Oregón, en EE.UU. (y en el cual ha participado Juan Carlos Izpisúa, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, California), ha explorado el uso de CRISPR-Cas en embriones humanos cultivados in vitro con el fin de reparar una alteración genética asociada a una enfermedad cardíaca. Publicaron sus resultados el pasado agosto en *Nature*. Los autores analizaron con detalle los embriones modificados y demostraron que algunos de los problemas técnicos que a menudo plantea la técnica podrían evitarse.

La miocardiopatía hipertrófica es un trastorno cardíaco congénito que puede estar causado por mutaciones de distintos genes, entre ellos *MYBPC3*. Este gen codifica la proteína de unión a la miosina cardíaca, la cual contribuye a mantener la estructura del miocardio y a regular su contracción y relajación. La presencia de una copia mutada de *MYBPC3* provoca síntomas que suelen dar lugar a un fallo cardíaco. Aunque existen tratamientos que mitigan los síntomas, no hay forma de hacer frente a la causa genética subyacente de la enfermedad. El equipo de Mitalipov empleó

la edición genética para corregir esta mutación.

Una opción para evitar que algunas enfermedades provocadas por mutaciones sean transmitidas a la descendencia consiste en llevar a cabo análisis genéticos durante el tratamiento de fecundación in vitro (FIV). Ello permite seleccionar los embriones que no contienen cierta mutación para su posterior implantación. Si uno de los progenitores tuviese una copia mutada de *MYBPC3*, el 50 por ciento de los embriones fecundados de la pareja heredaría la enfermedad. Los autores del reciente estudio proponen una estrategia para que un individuo con miocardiopatía hipertrófica genere un mayor porcentaje de embriones sin la enfermedad disponibles para ser implantados.

En los últimos años, el desarrollo de CRISPR-Cas ha permitido editar el genoma humano de forma eficaz y precisa. Aunque el método ha sido ampliamente utilizado en sistemas de cultivos celulares de mamíferos y en modelos de embriones animales, solo se han publicado tres estudios que describen su aplicación en embriones humanos.

La técnica necesita únicamente dos componentes para modificar el ADN: una secuencia de ARN guía y una enzima nucleasa (Cas), siendo Cas9 la que se utiliza con mayor frecuencia. La secuencia sobre la que actúa en el genoma viene determinada por el ARN guía, que forma un complejo con Cas9. El ARN guía dirige a la enzima hasta el lugar del genoma de la célula que contiene una secuencia complementaria con la del propio ARN guía. Es ahí donde Cas9 corta el ADN, lo que provoca una ruptura de la doble hebra.

Los cortes en la doble hebra pueden activar una de las dos rutas principales para la reparación del ADN en la célula: la ruta de unión de extremos no homólogos (NHEJ, por sus siglas en inglés); o la ruta de reparación dirigida por homología (HDR). La primera repara un corte mediante la introducción o eliminación de nucleótidos de forma aleatoria; al provocar cambios en la secuencia del ADN, resulta inapropiado para corregir genes. Las estrategias se centran, por tanto, en la ruta HDR, que utiliza secuencias homólogas (idénticas) para enmendar los cortes en el ADN; al permitir la introducción de secuencias específicas, hace posible una reparación a la carta.

La introducción de elementos del sistema CRISPR en un momento adecuado del ciclo de la división celular podría favorecer el empleo de la ruta HDR. Desgraciadamente, los estudios previos han demostrado una baja eficacia de la ruta HDR tras la acción de CRISPR-Cas9, tanto en cultivos de células madre embrionarias humanas (del 2 por ciento) como en embriones humanos (entre el 14,3 y el 25 por ciento).

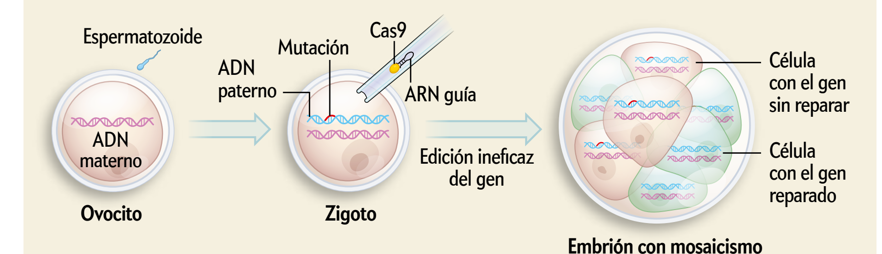
Una edición más eficaz y fiable

El equipo de Mitalipov creó elementos CRISPR-Cas9 para editar el gen *MYBPC3*, y verificó y analizó la eficacia de la estrategia mediante el empleo de células madre humanas. A continuación, empezaron a trabajar con embriones humanos. Uno de los principales obstáculos que plantea el uso de CRISPR-Cas9 en los embriones es el fenómeno del mosaicismo. Este se produce cuando, debido a una edición genética ineficaz, se forma un embrión que posee tanto células modificadas como no modificadas. Ello podría dar lugar a una mezcla de células sanas y enfermas en diversos tejidos y órganos, lo que probablemente provocaría los síntomas de la enfermedad.

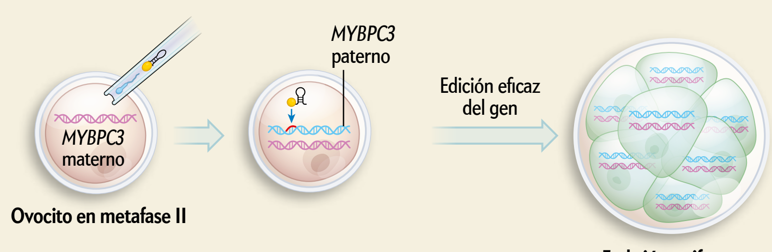
Los autores investigaron una situación en la que el padre presentaba una copia mutada de *MYBPC3* y la madre solo portaba copias normales del gen. En los experimentos de control, el 47,4 por ciento (9 de un total de 19) de los embriones fecundados in vitro no heredaron una copia mutada de *MYBPC3*, la proporción esperada dado que la mitad de los espermatozoides deberían tener una copia normal

EDICIÓN DE EMBRIONES

La técnica CRISPR-Cas9 permite corregir mutaciones en embriones humanos cultivados in vitro. El método se basa en la introducción en la célula de dos elementos: la enzima Cas9 y una secuencia de ARN guía que ayuda a dirigir la maquinaria de edición hacia un lugar específico del genoma (por ejemplo, para reparar una mutación heredada del padre).



En estudios anteriores, después de que un óvulo fuera fecundado por un espermatozoide, se inyectaban los elementos de edición genética en el zigoto. Sin embargo, la estrategia suele ser ineficaz y, en etapas posteriores, los embriones pueden contener una mezcla de células reparadas y no reparadas, un fenómeno que se conoce como mosaicismo.



En un estudio reciente, se adoptó otra estrategia. Para corregir una mutación en el gen *MYBPC3* (asociado a una cardiopatía), se inyectaron los elementos de edición genética y espermatozoides en ovocitos sin la mutación. La mitad de los espermatozoides presentaban una mutación en *MYBPC3*. La inyección se realizó cuando los ovocitos se encontraban en la etapa de metafase II de su ciclo celular. Como resultado, casi las tres cuartas partes de los embriones no contenían la mutación, y los análisis indicaron que se había utilizado la copia materna del gen como molde para guiar la reparación.

del gen. Los autores demostraron que si, junto con los espermatozoides, inyectaban los elementos del sistema de edición genética en un óvulo humano durante una etapa del ciclo celular de este denominada metafase II, el 72,4 por ciento de los embriones resultantes (42 de un total de 58) contenían únicamente la versión normal de *MYBPC3*. Los 16 embriones restantes tenían copias de *MYBPC3* con signos de haber experimentado edición mediante la ruta NHEJ, que había actuado sobre la versión mutada del gen pero que no la había reparado y convertido en la versión normal.

En los estudios anteriores de edición CRISPR-Cas9 en embriones humanos se habían añadido los elementos de ese sistema después de la fecundación. Los reducidos niveles de mosaicismo (uno de los 42 embriones con *MYBPC3* normal era un mosaico de células en el que cada una de ellas presentaba una de las dos versiones normales del gen) descritos por Mitalipov y sus colaboradores podrían ser el resultado de una edición producida antes de que hubiese tenido lugar la primera división celular.

Los embriones modificados crecieron de manera similar a los de control, y el 50 por ciento alcanzó una etapa temprana del desarrollo denominada blastocisto, en la que los embriones contienen distintos tipos celulares. Este dato indica que la edición no impide el desarrollo.

Al inyectar los elementos de la maquinaria de edición, los autores también incluyeron una secuencia de nucleótidos que contenía el *MYBPC3* normal para que pudiese ser utilizada como molde para la reparación. Los investigadores diseñaron el molde para que codificara los mismos aminoácidos que la copia normal del gen de la madre, pero utilizaron algunos nucleótidos distintos, de modo que pudiesen distinguir entre la reparación basada en la copia materna de *MYBPC3* de la basada en la inyectada.

Resulta interesante que, cuando los autores analizaron las correcciones del gen *MYBPC3* en los embriones, descubrieron que solo uno de los 42 que contenían copias normales había utilizado el molde inyectado para la reparación. Sus resultados indican que, probablemente, la copia normal de la madre, y no la que habían introducido, actuó de molde. Ello contrasta con las observaciones de los autores en células madre, donde la secuencia de nucleótidos añadida había servido de molde para la reparación. En el embrión en el que la corrección se había basado en el molde inyectado solo se detectó la secuencia del molde en un subconjunto de las células del embrión, y probablemente el resto de las células habían sido reparadas mediante la versión materna del gen.

Otro inconveniente de la técnica CRISPR-Cas9 radica en la posibilidad de que se produzcan modificaciones en lugares distintos del lugar deseado, lo que podría suceder si los elementos del sistema de edición se unieran a regiones genómicas que se asemejan mucho a la secuencia diana (hacia la que va dirigida el ARN guía). El equipo de Mitalipov no halló en la copia normal de *MYBPC3* ninguna alteración asociada a modificaciones realizadas fuera de la diana, lo que indica que el proceso de edición se llevó a cabo con un alto grado de fidelidad.

También se evaluó si se habían producido cambios no deseados (fuera de la diana) en otros genes. Sorprendentemente, en los resultados de secuenciación de las células embrionarias no se detectó ninguna mutación, con lo que se concluyó que la edición se había realizado con precisión. Este hallazgo reviste importancia porque las modificaciones fuera de la diana habían sido consideradas uno de los problemas que debían resolverse antes de utilizar CRISPR-Cas9 en la práctica clínica. Sin embargo, como habría variaciones en las secuencias diana, así como en las de cada genoma que se quisiera editar, el riesgo de observar modificaciones fuera de la diana también podría variar de un caso individual a otro.

Los autores investigaron una situación en la que necesitaban editar una copia de un gen y descubrieron que la reparación dependía de la otra copia normal del gen. Sin embargo, en algunas enfermedades, tanto la copia materna como la paterna presentan mutaciones. En este caso, no hay una copia normal, de manera que cualquier estrategia de reparación tendría que basarse en la introducción de una secuencia molde. La generación de cortes en la doble hebra de ambas copias mutadas del gen activaría el uso de un molde de este tipo; no obstante, puede que ello provoque una mayor utilización de la ruta nociva NHEJ. En este caso, es probable que determinadas estrategias que evitan la ruta NHEJ, como el uso de agentes bloqueadores, resulten cruciales. Esa táctica resultaría también ventajosa aunque solo se tuviera que editar una copia del gen, ya que 16 de los 58 embriones analizados por el equipo de Mitalipov mostraron signos de actividad NHEJ. Sin embargo, hay una necesidad clara de garantizar que este tipo de estrategias no producirá otros efectos dañinos en un embrión en desarrollo y su genoma.

Aunque el nuevo trabajo demuestra, de modo prometedor, que la edición CRISPR-Cas9 mantiene la integridad del genoma embrionario, se necesitarán más estudios, así como la optimización del método. Antes de que pueda aplicarse para tratar enfermedades congénitas, se tendrá que confirmar su seguridad por lo que respecta al mosaicismo, la edición fuera de la diana y la detección de anomalías en los embriones modificados. No obstante, este estudio, junto con otros, está allanando el camino que podría llevar la técnica CRISPR-Cas9 a la práctica clínica. Hasta entonces, el análisis genético de los embriones durante la FIV sigue siendo el método estándar para evitar la transmisión de enfermedades congénitas en embriones humanos.

Nerges Winblad *y* ***Fredrik Lanner***
pertenecen al Departamento de Ciencia Clínica, Intervención y Tecnología del Instituto Karolinska y al Hospital Universitario Karolinska, en Estocolmo.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 548, págs. 398-400, 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

CRISPR/Cas9-mediated gene editing in human tripronuclear zygotes. P. Liang et al. en *Protein & Cell*, vol. 6, págs. 363-372, 2015.
Introducing precise genetic modifications into human 3PN embryos by CRISPR/Cas-mediated genome editing. X. Kang et al. en *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*, vol. 33, págs. 581-588, 2016.
Human genome editing: Science, ethics, and governance. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. National Academies Press, 2017.
Correction of a pathogenic gene mutation in human embryos. H. Ma et al. en *Nature*, vol. 548, págs. 413-419, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

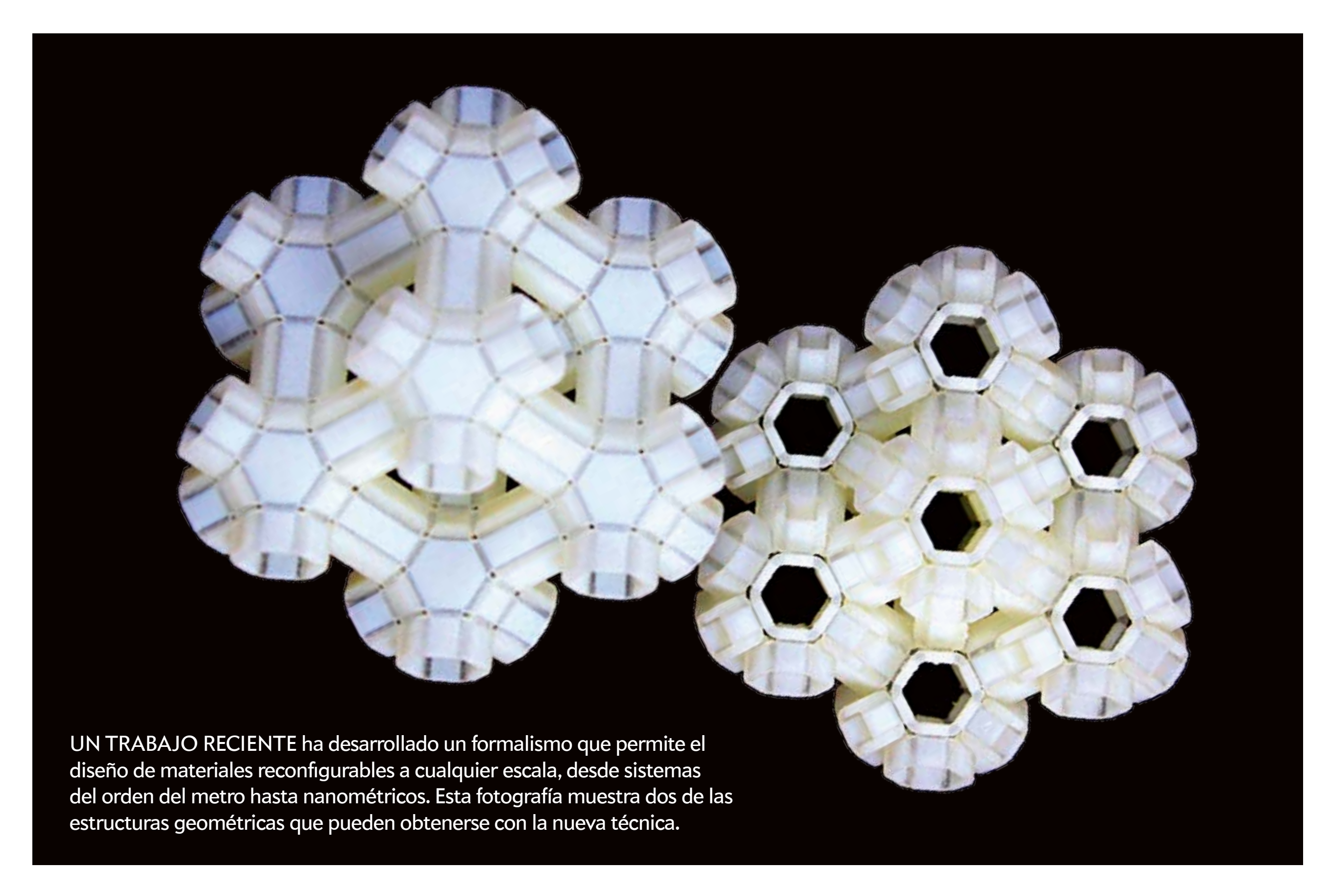
La edición genética, más precisa. Margaret Knox, en *IyC* febrero de 2015.
La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes. Sara Reardon en *IyC*, febrero de 2016.

METAMATERIALES

Materiales reconfigurables inspirados en la papiroflexia

Un algoritmo facilita el diseño de materiales capaces de modificar su estructura y, con ello, sus propiedades. El logro promete nuevos avances en robótica

JAMIE PAIK



UN TRABAJO RECIENTE ha desarrollado un formalismo que permite el diseño de materiales reconfigurables a cualquier escala, desde sistemas del orden del metro hasta nanométricos. Esta fotografía muestra dos de las estructuras geométricas que pueden obtenerse con la nueva técnica.

CORTESÍA DE JOHANNES T. B. OVERVELDE

Las propiedades de la mayoría de los materiales dependen de su composición. Sin embargo, estas pueden también cambiar de manera drástica cuando se altera su estructura cristalina. El fenómeno suele observarse en polímeros y en materiales inteligentes, cuyas cualidades varían en respuesta a estímulos externos, como cambios en la temperatura o el *p*H. Los llamados metamateriales se caracterizan por imitar dicho comportamiento gracias a estructuras creadas artificialmente. Numerosas técnicas automatizadas se beneficiarían del uso de metamateriales reconfigurables. En un artículo publicado este año en *Nature*, Johannes Overvelde, ahora en el Instituto de Física Atómica y Molecular (AMOLF) de Ámsterdam, y otros investigadores han presentado un algoritmo que permite diseñar ciertos materiales de este tipo e investigar sus propiedades de deformación.

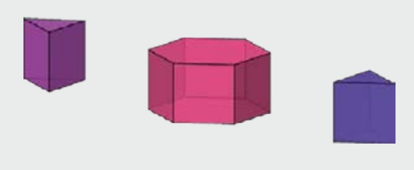
Los avances en las técnicas de fabricación han facilitado la creación de materiales artificiales cuya producción por métodos tradicionales resultaría imposible o muy laboriosa. Dichas técnicas permiten construir componentes mecánicos complejos, imprimir objetos tridimensionales escaneados y preparar estructuras que pueden incluso «programar» la rigidez de un material.

Tales adelantos cuentan con diversas aplicaciones, pero han mostrado una utilidad especial en robótica. A fin de construir robots adaptables y que interactúen fácilmente con el entorno, se necesitan diseños que permitan modificar la forma y el ensamblaje de las máquinas. Estos robots reconfigurables se basan en componentes físicos que cambian de forma en función de la tarea o del entorno. Con todo, el mayor desafío lo plantea la determinación de los parámetros geométricos y mecánicos necesarios para los distintos ambientes y trabajos.

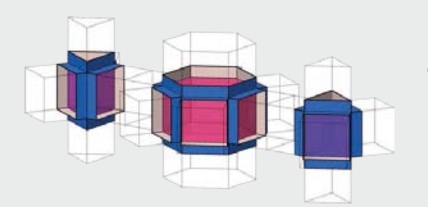
Uno de los principios que permiten abordar tal cuestión es el diseño inspirado en la papiroflexia, u origami, consistente en crear materiales doblando superficies por líneas de pliegue predefinidas. En la práctica, sin embargo, no todas las arquitecturas basadas en esta técnica pueden reconfigurarse y, además, no resulta obvio discernir cuáles se prestan a ello. El algoritmo de Overvelde y sus colaboradores permite analizar varias de estas geometrías reconfigurables. Su trabajo se centra en figuras de papiroflexia prismáticas y en sus respectivas disposiciones tridimensio-

ASÍ FUNCIONA

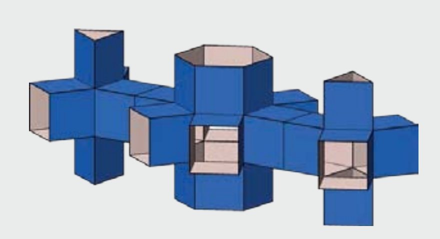
Las propiedades de un material pueden «programarse» modificando su estructura. Una manera de obtener materiales artificiales reconfigurables se basa en emplear técnicas inspiradas en la papiroflexia; es decir, doblando superficies por líneas de pliegue predefinidas. Un trabajo reciente ha propuesto un nuevo método para diseñar materiales prismáticos con estructuras reconfigurables y predecir sus modos de deformación. Los pasos siguientes ilustran el proceso.



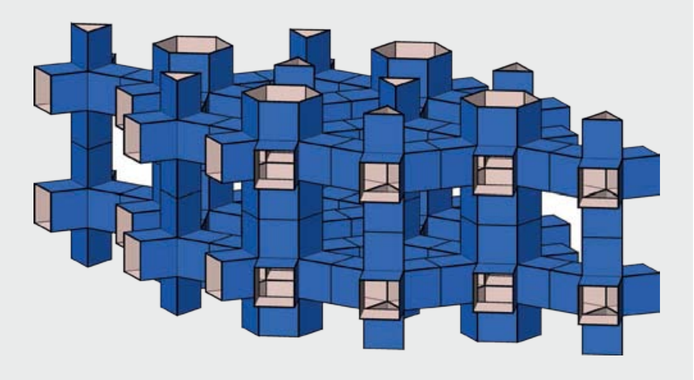
1 Identificación de una unidad de repetición compuesta por poliedros.



2 Extrusión de pilares prismáticos de igual longitud de las caras de los poliedros.



3 Alineamiento de prismas con una misma sección transversal y combinación de las formas resultantes para dar lugar a la celda básica del material.



4 Acoplamiento repetido de las celdas y obtención del material estructurado.

nales, las cuales revisten importancia no solo para el diseño de módulos para robots plegables, sino también para estructuras para edificios (con un tamaño del orden de metros), así como para entender mejor numerosas reacciones químicas y diversos materiales.

Doblar y pegar

La idea de diseñar un material a partir de estructuras reconfigurables y controlables inspiradas en la papiroflexia no es nueva. De hecho, el año pasado Overvelde y otros investigadores ya habían presentado un algoritmo para diseñar un material altamente configurable basado en la «esnapología», una modalidad concreta de papiroflexia. Los autores han usado ahora dicho algoritmo para explorar en mayor profundidad los grados de libertad de estos materiales, teniendo en cuenta los tipos de geometría prismática que permite su estructura.

A fin de entender el proceso, imagínese que se extruden todas las caras de un poliedro para moldear pilares prismáticos de igual longitud. La forma resultante puede combinarse con otras estructuras obtenidas de manera similar. Para ello, se hacen coincidir los prismas que tengan la misma sección transversal, originando así una unidad básica, o celda, del material objeto de diseño. Dichas celdas pueden después acoplarse para dar lugar al material propiamente dicho. Los autores hallaron que los modos de deformación dependían de manera previsible de la teselación de las celdas y de la forma de los prismas extruidos. Overvelde y sus colaboradores proporcionan asimismo un algoritmo para determinar los parámetros geométricos de los prototipos de cartón que pueden construirse como modelo. Estas estructuras incluyen sistemas de prismas triangulares y hexagonales, octaedros y cuboctaedros, así como de prismas triangulares únicamente.

Los investigadores muestran también que no se requiere la extrusión de todas las caras del poliedro original para formar parte de una celda, y que los modos de deformación y la movilidad del material resultante cambian en función de cuáles sean las caras extruidas. De esta manera, mediante la reconfiguración de las celdas se brinda un medio para modificar sus propiedades. Los autores demuestran que los parámetros geométricos de las celdas dictan el movimiento general, la funcionalidad y el espacio físico ocupado por el material. De hecho, el algoritmo permite determinar la movilidad y los modos de deformación de los materiales prismáticos diseñados.

Nuevas geometrías

Uno de los aspectos más atractivos del nuevo algoritmo reside en que describe materiales definidos por reglas físicas y estructurales simples: la arquitectura deformable consta, en su totalidad, de un solo tipo de celda. La idea de usar celdas repetidas nos retrotrae a los principios de diseño de los robots modulares e inspirados en la papiroflexia.

La capacidad de controlar un material estructurado artificialmente podría aumentarse introduciendo articulaciones «bloqueables» que pudieran hacerse rígidas o flexibles, en lugar de las bisagras elásticas pasivas empleadas en el estudio. Los autores trabajaron a mano con los prototipos para poner de manifiesto los modos de deformación, pero la magnitud

IMÁGENES ADAPTADAS DE: «RATIONAL DESIGN OF RECONFIGURABLE PRISMATIC ARCHITECTED MATERIALS», JOHANNES T. B. OVERVELDE ET AL., *NATURE*, VOL. 541, PÁGS. 347-352, ENERO DE 2017.

y la dirección de las tensiones de carga aplicadas se ven limitadas por la flexibilidad de los goznes. La presencia de articulaciones bloqueables activas validaría los efectos de los modos reconfigurables bajo cargas diversas. También facultaría a los investigadores en robótica para descubrir diseños de papiroflexia con grados de libertad controlables y dictados únicamente por las limitaciones geométricas que imponga un módulo basado en celdas repetidas.

La construcción de piezas físicas interactivas y versátiles con un alto grado de libertad y movilidad sigue planteando un importante desafío de diseño a numerosos robots e instrumentos automatizados. En este sentido, el nuevo trabajo presenta una estrategia robusta para diseñar tales modos reconfigurables en materiales estructurados artificialmente. En principio, debería ser posible obtener numerosas geometrías a partir de diferentes conjuntos de poliedros convexos. Y el algoritmo de los autores bien podría trasladarse al desarrollo de mecanismos automatizados, incluidos sistemas robóticos basados en papiroflexia.

Jamie Paik *investiga en el Laboratorio de Robots Reconfigurables de la Escuela Politécnica Federal de Lausana*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 541, págs. 296-297, 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics. Rolf Pfeifer, Max Lungarella y Fumiya Iida en *Science*, vol. 318, págs. 1088-1093, noviembre de 2007.
Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials. Jesse L. Silverberg et al. en *Science*, vol. 345, págs. 647-650, agosto de 2014.
Rational design of reconfigurable prismatic architected materials. Johannes T. B. Overvelde et al. en *Nature*, vol. 541, págs. 347-352, enero de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los metamateriales se acercan al mercado. Lee Billings en *IyC*, febrero de 2014.
Cómo construir un robot pulpo. Katherine Harmon en *IyC*, abril de 2014.
Metal bípedo. John Pavlus en *IyC*, octubre de 2016.

SOSTENIBILIDAD

Comer hasta desecarnos

¿Afectan nuestros hábitos de consumo al agotamiento del agua subterránea como resultado del comercio internacional de alimentos? Un análisis global lo corrobora y señala los productos y países con mayor repercusión

MAITE M. ALDAYA

El alarmante descenso que están experimentando los niveles freáticos en las regiones áridas y semiáridas de nuestro planeta se debe en gran parte al riego practicado en las explotaciones agrícolas en los últimos 50 años sin apenas control y planificación por parte de los organismos gubernamentales. Si bien tales formas de riego han reportado numerosos beneficios socioeconómicos y suelen ser menos proclives a la corrupción que los proyectos equivalentes con aguas superficiales, también han conllevado daños ecológicos como la subsidencia del terreno, la intrusión de agua marina en zonas costeras y la pérdida de manantiales y humedales. En parte, esos problemas parecen guardar relación con la exportación y el



consumo de materias primas. Carole Dalin, del Colegio Universitario de Londres, y otros investigadores han realizado el primer estudio cuantitativo sobre la pérdida global de agua subterránea no renovable derivada de las prácticas de riego implicadas en el comercio mundial de alimentos. Los resultados se han publicado en *Nature*.

El concepto de comercio de «agua virtual» (el agua empleada en la producción de mercancías) se introdujo para explicar que la importación de alimentos podía conllevar un ahorro de agua en Oriente Medio. La idea ilustraba que las importaciones permitirían a Oriente Medio gastar en producción agrícola un menor volumen de sus aguas que si la región produjera sus propios alimentos. Varios estudios han cuantificado los volúmenes de agua virtual integrada en el comercio de productos agroalimentarios a fin de relacionar el consumo de alimentos con la escasez de agua en las regiones productoras.

En el trabajo citado, Dalin y sus colaboradores han ahondado en su análisis del comercio de agua virtual mediante el cálculo de la pérdida de agua subterránea no renovable como consecuencia del comercio de alimentos practicado entre 2000 y 2010. En su estudio correlacionan la cantidad de agua de riego extraída de reservas de agua subterránea no renovable con el volumen de comercio asociado. El análisis puede ejercer cierta influencia tanto en los planes de gestión de las reservas hídricas globales como en las crecientes líneas de investigación que estudian las huellas socioeconómicas del comercio mundial.

Los autores demuestran que cerca del 11 por ciento del agua subterránea no renovable aprovechada durante el período estudiado se exportó a través del comercio agrario. De ese porcentaje, unos dos tercios correspondió a las exportaciones conjuntas de Pakistán (29 por ciento), Estados Unidos (27 por ciento) y la India (12 por ciento). Los investigadores también han hallado que la inmensa mayoría de la población mundial vive en países que importan la práctica totalidad de sus alimentos básicos de naciones que consumen agua subterránea no renovable. Debido al agotamiento de las reservas subterráneas, algunos países (como Estados Unidos, México, Irán y China) ponen particularmente en peligro su seguridad alimentaria e hídrica, ya que son al mismo tiempo productores e importadores de productos agrarios regados con agua extraída de unos acuíferos que se desecan rápidamente.

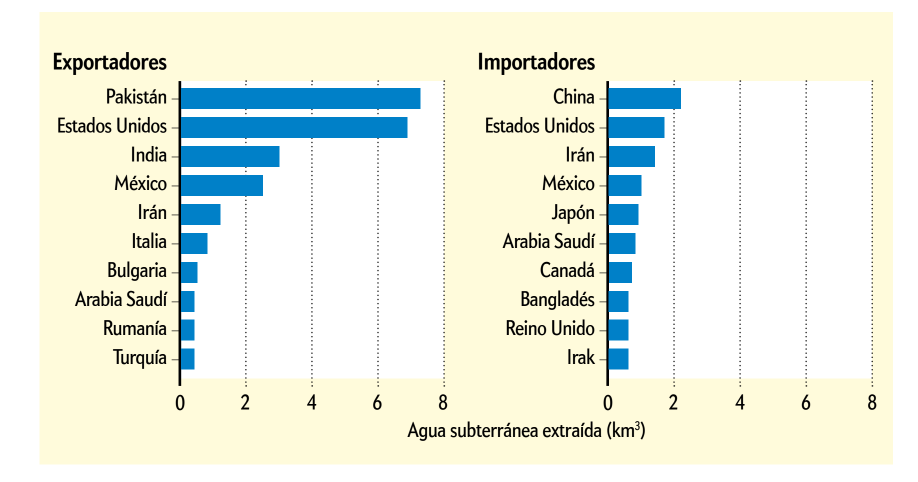
Un problema global y local

El estudio de Dalin y sus colaboradores se basa mayormente en extensos conjuntos de datos y en un análisis a escala mundial. Por tanto, las cifras que han obtenido representan en general valores promedio con un amplio margen de incertidumbre. Evaluar las reservas de agua subterránea implica de por sí cierta imprecisión, ya que las propiedades de la atmósfera y el suelo presentan una enorme variabilidad, sobre todo en las regiones áridas y semiáridas. Como consecuencia de esa incertidumbre, los resultados de distintas investigaciones pueden llegar a ser considerablemente dispares. Por tanto, hay que ser precavidos a la hora de extraer conclusiones a partir de estudios globales de agua subterránea, sobre todo teniendo en cuenta que en tales trabajos las incertidumbres individuales asociadas al cálculo de determinadas cantidades se acumulan para dar lugar a incertidumbres totales todavía mayores.

El análisis de Dalin y sus colaboradores asume que los factores técnicos y sociales que influyen en el aprovechamiento del agua subterránea no van a cambiar. Las implicaciones de su estudio (que el agotamiento del agua subterránea asociada al comercio mundial de alimentos es insostenible) podrían estar describiendo, por tanto, la peor situación posible. Pero la realidad es más compleja. A pesar de que hoy se destina a las prácticas agrarias el 70 por ciento del agua subterránea extraída, resulta difícil predecir cómo evolucionarán las circunstancias en los próximos cien años.

Las evaluaciones de las reservas hídricas subterráneas a escala global sirven para subrayar la necesidad internacional de responder ante el agotamiento del agua subterránea. Por otro lado, el agua representa también un recurso local que se mueve en cuencas fluviales o acuíferos específicos. Por tanto, se requieren estudios a menor escala para poder tomar decisiones políticas importantes, puesto que los detalles observados a nivel local son fundamentales para entender el contexto, los condicionantes y los principales parámetros que influyen en las reservas de agua subterránea. La hidrogeología es un factor, pero también deben contemplarse aspectos económicos, sociales, culturales y ambientales.

En el sudeste de España, por ejemplo, el bombeo intensivo del agua subterránea y la minería de la misma (una extracción continuada que a menudo excede la recarga) practicados para regar los cultivos comerciales y, cada vez más, para abastecer al turismo, han causado una disminución de las reservas de unos 15 kilómetros cúbicos. Así lo demuestra el estudio realizado por Emilio Custodio,



LOS DIEZ MAYORES EXPORTADORES E IMPORTADORES de agua subterránea vinculada al comercio de alimentos. La causa principal del acelerado agotamiento de las reservas de agua subterránea reside en la extracción destinada al riego de las explotaciones agrícolas. Los cultivos importados y exportados por países involucrados en el comercio internacional de alimentos contienen una cantidad «virtual» de agua correspondiente a una fracción del agua subterránea no renovable explotada a nivel global. Se ha cuantificado el volumen de agua subterránea extraída que estuvo integrada en el comercio internacional de alimentos entre 2000 y 2010. La gráfica muestra los diez mayores exportadores e importadores del agotamiento de agua subterránea en 2010.

de la Universidad Politécnica de Cataluña, y sus colaboradores y publicado en *Science of the Total Environment* en 2016. La situación ha supuesto ocasionalmente serios problemas administrativos, legales y ambientales, aunque a su vez ha conllevado un importante desarrollo económico y social. El hecho de que el aprovechamiento de un recurso vital agotable esté controlado por las fuerzas del mercado suscita preocupaciones éticas que apuntan hacia la necesidad de un cambio radical en la gestión de los recursos ambientales.

Gestión y consumo responsables

El trabajo de Dalin y sus colaboradores identifica las regiones y los productos agrícolas expuestos a un mayor riesgo como consecuencia del agotamiento del agua subterránea. Sus observaciones deberían servir como una llamada de advertencia a las naciones y las autoridades al cargo de cuencas fluviales para considerar la influencia del comercio agrícola en el agotamiento de las aguas subterráneas no renovables y en la sostenibilidad del consumo nacional. La advertencia también debería dirigirse a la mentalidad de los consumidores, que suelen hacer la vista gorda a las cadenas de suministro y las repercusiones de la comida importada.

Las evaluaciones globales suponen el primer paso hacia una mayor sostenibilidad de la producción de alimentos a nivel mundial, ya que proporcionan nuevos datos y perspectivas sobre el contexto general, así como sobre las fuerzas motoras del uso y abuso del agua. Analizar los problemas ambientales relacionados con el comercio también podría facilitar el planteamiento de nuevas soluciones para la gestión de los recursos hídricos a nivel mundial, que podrían aplicarse mediante la introducción de medidas cuyo fin consistiera en asegurar que los marcos referentes al comercio de alimentos del mercado único europeo y la Organización Mundial del Comercio sean efectivos, sostenibles y equitativos.

Maite M. Aldaya *es colaboradora del Observatorio del Agua en Madrid y consultora del Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 543, págs. 633-634, marzo de 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Evolution of the global virtual water trade network. Carole Dalin et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 109, págs. 5989-5994, 2012.
The water footprint of humanity. Arjen Y. Hoekstra y Mesfin M. Mekonnen en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 109, págs. 3232-3237, 2012.
Groundwater depletion embedded in international food trade. Carole Dalin et al. en *Nature*, vol. 543, págs. 700-704, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aprovechamiento agrícola del agua. Sandra Postel en *IyC*, abril de 2001.
Importación y exportación del agua. Mark Fischetti en *IyC*, abril de 2013.
La humanidad consume más agua de la que se creía. Fernando Jaramillo en *IyC*, agosto de 2016.



EL DES

CUBRIMIENTO DEL SISTEMA CRISPR-Cas

Décadas de investigación básica sobre la biología de los procariotas han propiciado el hallazgo de un mecanismo microbiano de inmunidad adquirida. Sus aplicaciones como herramienta de edición genética parecen no tener límite

Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros

Francisco J. M. Mojica es profesor del Departamento de Fisiología, Genética y Microbiología de la Universidad de Alicante, donde dirige un grupo de investigación especializado en el estudio de los sistemas CRISPR-Cas. Es considerado el promotor de la investigación en este campo por sus trabajos pioneros y la repercusión fundamental de sus contribuciones.

Cristóbal Almendros es investigador del grupo de Mojica. Actualmente realiza una estancia posdoctoral en la Universidad Tecnológica de Delft. Su tesis doctoral fue la primera en España centrada íntegramente en los sistemas CRISPR-Cas.

LOS VIRUS SUPONEN UNA AMENAZA PERMANENTE. LAS células de todos los seres vivos son vulnerables a su ataque. Destacan por su simplicidad estructural, al hallarse constituidos por tan solo un genoma (de ADN o ARN) y una cápside que les proporciona protección y la capacidad de reconocer e invadir a hospedadores potenciales.

Pero, al contrario de lo que se podría pensar, la mayor parte de los 10^{31} virus que moran en la Tierra no atacan a organismos pluricelulares de gran tamaño, sino que se propagan de un organismo microscópico a otro. La incidencia de dicha infección es especialmente elevada en los procariotas, seres unicelulares que, a diferencia de los eucariotas, se hallan desprovistos de núcleo y suponen, después de los virus, la segunda entidad biológica más abundante de nuestro planeta. Su cifra asciende a unos $5{\cdot}10^{30}$ individuos y comprenden dos grandes grupos: las bacterias y las arqueas.

La invasión de un procariota por una partícula vírica puede tener consecuencias nefastas para él, ya que normalmente le provoca la muerte. El proceso infeccioso se inicia tras la unión del virus a un componente de la envoltura celular del procariota, que va seguida de la introducción de su material genético en el citoplasma. Una vez en su interior, tiene la posibilidad de replicarse gracias al empleo de los componentes celulares del procariota, con la consiguiente alteración de la actividad de la célula. Tras haber finalizado la replicación, se generan nuevas partículas víricas completas que finalmente se liberarán, por regla general, mediante un proceso denominado lisis, que provoca la destrucción de la célula por rotura de su envoltura.

No resulta, pues, sorprendente que los procariotas, tanto bacterias como arqueas, cuenten con mecanismos para zafarse de esos elementos genéticos invasores. A pesar de ello, los virus logran destruir cada día hasta el 40 por ciento de las bacterias de los océanos, donde el número de partículas víricas ($3{,}5{\cdot}10^{29}$) supera en diez veces el de las formas de vida celular. El impacto de la infección vírica sobre el control de las poblaciones procariotas y, por tanto, sobre la vida en el planeta, es formidable.

Desde hace algunas décadas, varios investigadores de la Universidad de Alicante hemos dedicado buena parte de nuestro trabajo a desentrañar los mecanismos moleculares que conforman la respuesta de los procariotas frente a la infección vírica. A inicios de los años noventa logramos dar los primeros pasos en la descripción de este sistema de defensa fundamental de las bacterias y las arqueas contra los virus, que más tarde denominamos CRISPR-Cas. Los importantes avances a los que hemos contribuido junto a otros grupos en este tema han dado lugar al desarrollo de una potente herramienta de edición genética cuyas aplicaciones no parecen tener límite. El camino recorrido hasta llegar a esta técnica ha supuesto años de investigación básica en microbiología, en los que se han ido sucediendo, uno tras otro, los hallazgos sobre el mecanismo de inmunidad microbiana.

INMUNIDAD INNATA E INMUNIDAD ADQUIRIDA

En los años cincuenta, dos equipos de investigadores de la Universidad de Illinois formados por Salvador E. Luria y Mary L. Human, por un lado, y por Giuseppe Bertani y Jean-Jacques Weigle, por otro, observaron que la eficacia infectiva de un virus que atacaba a la bacteria *Escherichia coli* variaba de forma sustancial de unas cepas a otras de la bacteria. Inexplicablemente,

EN SÍNTESIS

Los virus ponen en riesgo a todas las formas de vida. Para defenderse, incluso los organismos más simples, los procariotas, poseen instrumentos que limitan su proliferación. Pero no siempre consiguen su objetivo, manteniéndose así el equilibrio necesario entre ambos en las comunidades biológicas.

Los sistemas CRISPR-Cas constituyen el único mecanismo de defensa procariótico con capacidad adaptativa y que se transmite a la descendencia. Al conllevar un registro de infecciones en el genoma, permite reconocer y, eventualmente, destruir el material genético de invasores reincidentes.

El descubrimiento de este sistema de inmunidad adquirida ha supuesto un gran avance del conocimiento. En base a él se han desarrollado herramientas moleculares de edición genética que están facilitando de manera inusitada la investigación científica y proveyendo infinidad de aplicaciones.



EN LA SALINA SOLAR BRAS DEL PORT, en Santa Pola (Alicante), se aisló la arquea *Haloferax mediterranei*, el microorganismo con el que Mojica y sus colaboradores llevaron a cabo los primeros experimentos sobre los sistemas CRISPR-Cas.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

la vulnerabilidad a la infección dependía en gran medida de la cepa bacteriana a la que había infectado antes el virus.

Una década más tarde, los laboratorios de Werner Arber, de la Universidad de Ginebra, y Matthew Meselson, de la Universidad Harvard, desvelaron la causa de ese fenómeno. Las bacterias en cuestión contaban con una estrategia de defensa innata denominada sistema de restricción-modificación (R-M) que les permitía reconocer e inactivar a los virus invasores. Tales sistemas se basan en la intervención de una enzima endonucleasa, también denominada restrictasa, que corta y digiere la molécula del ADN vírico en cierta secuencia correspondiente a unos pocos pares de bases. Al mismo tiempo, una enzima metilasa evita la degradación de la misma secuencia presente en el propio ADN bacteriano, lo que se produce gracias a la modificación previa de dicha secuencia por la adición en ella de grupos metilo. De esta manera, cuando un virus de ADN infecta a un procariota, las restrictasas residentes podrán degradarlo y abortar así la infección.

En contraposición con la inmunidad adquirida, en la que se elabora una respuesta específica frente a diversos patógenos, adaptada a ellos, los R-M se consideran sistemas de inmunidad innata debido a su inespecificidad y carencia de adaptabilidad. Como consecuencia, los R-M son incapaces de redirigir su inmunidad frente a los invasores resistentes o de adaptarse a ellos.

Pero en la carrera armamentística que tiene lugar en la naturaleza entre los virus y sus hospedadores, algunos virus han adquirido diversos mecanismos que inactivan o hacen ineficaces los sistemas R-M. Entre ellos cabe citar los virus que modifican su propio ADN para protegerlo de la restricción (o degradación) llevada a cabo por la bacteria.

Por su parte, los procariotas poseen varias barreras genéticas que son alternativas o complementarias a los sistemas R-M. Entre estas herramientas de defensa figuran los sistemas CRISPR-Cas. Las CRISPR, siglas inglesas de «repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas», corresponden a secuencias repetidas en el ADN procariota entre las que se localiza información sobre determinados virus, lo que permite identificarlos. Por otro lado, las proteínas Cas (por las siglas en inglés de «asociadas a CRISPR») comprenden endonucleasas que actúan sobre la molécula genética del virus. Al producir un corte en ella, impiden la proliferación vírica.

De forma similar al sistema R-M, el mecanismo CRISPR-Cas proporciona protección frente a los elementos genéticos invasores mediante la digestión de secuencias genéticas víricas específicas. Sin embargo, la capacidad de reconocer y actuar sobre esas secuencias viene determinada por unas moléculas de ARN, las cuales guían a una proteína Cas, con actividad endonucleasa, hasta las secuencias que esta debe cortar y degradar. Los ARN guía contienen secuencias que son copia de fragmentos de

ADN de origen exógeno, los cuales, a su vez, proceden del material genético de virus u otros elementos genéticos invasores previamente incorporados en la región del genoma de la célula donde se localizan las unidades repetidas CRISPR.

Las regiones CRISPR actúan, por tanto, como un registro de entrada de dichos elementos, dirigiendo una respuesta específica frente a ellos y dotando de capacidad adaptativa a este sistema de inmunidad. CRISPR-Cas representa la única forma de inmunidad adquirida descrita hasta la fecha en procariotas.

UN HALLAZGO FORTUITO

Los primeros elementos identificados de lo que más adelante se conocería como sistema CRISPR-Cas fueron las secuencias repetidas en cuestión (las denominadas CRISPR). A finales de los años ochenta, el grupo de investigación de Atsuo Nakata, en la Universidad de Osaka, descubrió en el cromosoma de *Escherichia coli* una secuencia de 29 pares de bases que se repetía varias veces con una misma orientación (repetición directa). Esa repetición contenía una región simétrica (palindrómica) que correspondía a la duplicación de una secuencia de 7 pares de bases orientada en sentido inverso una con respecto a la otra (repetición invertida).

Aunque ya se conocían repeticiones palindrómicas en *E. coli*, la secuencia recién descubierta era notablemente distinta. Además, las repeticiones presentaban la singularidad de que la distancia entre ellas dentro de una agrupación era muy semejante: 32 pares de bases o, excepcionalmente, 33. Se trataba, por tanto, de repeticiones regularmente espaciadas por regiones de secuencia variable, denominadas espaciadores. Mientras que la función desempeñada por estas repeticiones constituía un enigma, Nakata y sus colaboradores plantearon la posibilidad de que participaran en la regulación de la expresión de genes localizados en las inmediaciones.

En 1991, miembros del laboratorio dirigido por Jan D. A. van Embden, en el Instituto Nacional de Salud Pública y Protección Ambiental de Holanda, al analizar una región del cromosoma de bacterias del complejo *Mycobacterium tuberculosis* (CMT, denominación dada a un grupo de especies de micobacterias), hallaron una agrupación de repeticiones directas de 36 pares de bases, separadas por espaciadores de entre 35 y 41 pares de bases. Constataron la presencia de esas repeticiones en diferentes especies del CMT. Observaron, asimismo, que existía una diversidad notable tanto en el tamaño de la región de las repeticiones como en cuanto a la secuencia de los espaciadores, no solo entre especies sino incluso entre distintos aislados (cultivos microbianos puros) de la misma especie. Aunque no llegaron a establecer una relación entre esas repeticiones directas con las de *E. coli*, coincidieron con la propuesta del equipo de Nakata sobre su posible implicación en la regulación génica. Si bien la función desempeñada por las repeticiones en *E. coli* o CMT no fue abordada experimentalmente durante los años posteriores, las regiones que las contienen se han utilizado desde principios

LOS HALLAZGOS

El largo camino de la investigación básica

La técnica de edición genética CRISPR-Cas, que está revolucionando la biotecnología, hunde sus raíces en decenios de investigación básica. El trabajo de varios grupos de investigación, con aportaciones fundamentales del grupo de Mojica, ha permitido describir el sistema de inmunidad microbiana sobre el que se basa la técnica. Los descubrimientos se sucedieron del siguiente modo:

1987: El grupo de A. Nakata identifica en bacterias repeticiones directas de ADN, palindrómicas y regularmente espaciadas.

1993: F. J. M. Mojica descubre en arqueas repeticiones equivalentes a las bacterianas y comprueba que las agrupaciones de repeticiones-espaciadores se transcriben en ARN.

1995: Mojica y sus colaboradores constatan la incompatibilidad entre plásmidos y cromosomas que contienen agrupaciones de repeticiones-espaciadores.

2000: Mojica y sus colaboradores nombran SRSR a las repeticiones y reconocen su relevancia biológica en procariotas.

2002: Los grupos de J. D. A. van Embden y W. Gaastra acuerdan con el de Mojica renombrar CRISPR a las repeticiones SRSR e identifican los genes *cas*, localizados cerca de las regiones CRISPR.

2005: Los grupos de Mojica y Vergnaud establecen el origen de los espaciadores y proponen que el sistema CRISPR-Cas se halla implicado en la inmunidad de los procariotas.

2007: Los equipos de S. Moineau, D. A. Romero y P. Horvath demuestran que CRISPR-Cas se halla implicado en la inmunidad de los procariotas frente a virus.

2008: L. A. Marraffini y E. J. Sontheimer demuestran que el sistema CRISPR-Cas confiere inmunidad frente a plásmidos e identifican moléculas de ADN sobre las que actúa el sistema.

El grupo de J. van der Oost descubre que las moléculas ARN derivadas de CRISPR (ARNcr) actúan como guía en el sistema de inmunidad.

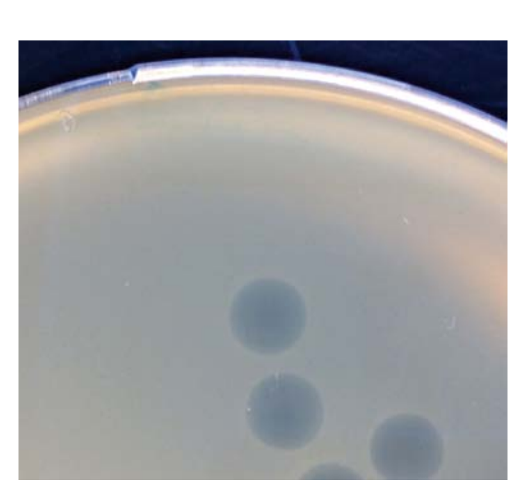
2009: El grupo de Mojica define los motivos PAM, secuencias adyacentes a las precursoras de los espaciadores.

2010: El equipo de Moineau comprueba que los sistemas CRISPR-Cas provocan cortes en ácidos nucleicos invasores.

Identificación de los componentes de CRISPR-Cas | Descripción de la función de CRISPR-Cas

de los años noventa como marcadores para diferenciar entre cepas del CMT.

Mientras se producían estos avances, en el laboratorio de Francisco E. Rodríguez Valera, en la Universidad de Alicante, estábamos trabajando con un microorganismo peculiar que habita en las salinas de Santa Pola, no muy lejos de la universidad. Se trata de *Haloferax mediterranei*, una especie del grupo de las arqueas halófilas extremas, las cuales medran en ambientes hipersalinos. Uno de nosotros (Mojica) llevaba a cabo la tesis doctoral bajo la supervisión de Valera y Guadalupe Juez, de la misma universidad. El objetivo inicial de la tesis consistía en identificar los mecanismos moleculares implicados en la adaptación de arqueas halófilas a cambios en la concentración de las sales. Pero, de modo fortuito, al secuenciar parte del genoma de *H. mediterranei*, descubrimos una agrupación de repeticiones en las inmediaciones de regiones relacionadas con la respuesta a la salinidad, aunque no parecían intervenir en tal respuesta. Se trataba de secuencias reiteradas y parcialmente palindrómicas, con una disposición equivalente a la previamente descrita en las bacterias por los grupos de Nakata y van Embden. Publicamos nuestros hallazgos en 1993 en la revista *Molecular Microbiology*.



CULTIVO BACTERIANO infectado por un virus. El crecimiento de la bacteria sobre un sustrato sólido da lugar a una masa densa de células que confiere turbidez al medio. La infección vírica genera zonas con menor densidad celular (*círculos oscuros*).

Las marcadas diferencias entre las condiciones que soportan el crecimiento de bacterias como *E. coli* (habitante del intestino) y el de halófilos extremos (de entornos con una salinidad diez veces superior a la del agua de mar) nos indicaban que la función desempeñada por estas secuencias no tenía que ver con una adaptación a un ambiente particular. En lugar de ello, su misión debería de estar implicada en algún aspecto muy general de la biología de los procariotas. Por otra parte, aunque el tamaño y la estructura celular de bacterias y arqueas es similar, ambos grupos han evolucionado de manera independiente durante miles de millones de años y difieren en aspectos bioquímicos fundamentales. Bajo la premisa de que se trataba de secuencias repetidas con un mismo origen, la enorme distancia evolutiva entre ambos grupos nos hacía pensar que tales repeticiones constituían un rasgo ancestral, y que probablemente estarían presentes en una gran variedad de procariotas.

OBSERVACIÓN DE ARN Y GENES *CAS*

Las primeras pruebas de la actividad de esas secuencias (más tarde denominadas CRISPR) fueron obtenidas precisamente en arqueas halófilas, en el marco de la tesis doctoral de Mojica. Al buscar cuál sería la función de las repeticiones, nos dimos cuenta de que, aunque se localizaban en regiones no codificantes (carecían de las características requeridas para la producción de proteínas), una de las agrupaciones de *H. mediterranei* se transcribía y daba lugar a una población de moléculas de ARN de pequeño tamaño. También observamos que otra especie del mismo género, *H. volcanii*, incluía en su genoma repeticiones muy semejantes a las de *H. mediterranei*.

Sorprendentemente, cuando introdujimos en *H. volcanii* un plásmido (molécula de ADN capaz de replicarse de forma autónoma) que contenía un fragmento con repeticiones y espaciadores, descubrimos que tal manipulación provocaba la pérdida del genoma de la arquea. Este efecto ponía de manifiesto que se producía un fenómeno de interferencia relacionado de algún modo con las repeticiones, el cual se atribuyó a una incompatibilidad entre moléculas portadoras de dichas secuencias dentro de una misma célula. Sin embargo, los experimentos posteriores que llevamos a cabo en *E. coli* y *Haloferax* (resultados no publicados) no nos permitieron esclarecer la naturaleza de dicha interferencia. Mientras tanto, la lista de procariotas que contenían repeticiones regularmente espaciadas se fue ampliando, gracias a la secuenciación de genomas completos por parte de otros grupos de investigación.

En 1997, tras un período de estancias posdoctorales en otros centros, Mojica regresó a la Universidad de Alicante y creó su propio equipo de investigación, con el objetivo de centrarse en esas secuencias. Al equipo se incorporaría más tarde el otro autor de este artículo (Almendros).

A finales de los noventa, nuestro grupo identificó, en un total de ocho genomas de arqueas y bacterias, repeticiones con un tamaño y una organización semejantes a las descritas previamente. El análisis comparativo de dichas regiones nos permitió definir las características distintivas de esta nueva familia de repeticiones, que denominamos SRSR (siglas inglesas de «repeticiones cortas regularmente espaciadas»). En ella se incluirían repeticiones identificadas por otros autores, muchas de las cuales no se habían relacionado antes entre sí. Ese estudio puso de manifiesto la gran incidencia de las SRSR, puesto que representaban la familia de repeticiones más ampliamente distribuida en el genoma de los procariotas. Los datos nos hacían pensar que debían de desempeñar un papel relevante en estos microorganismos.

La familia de repeticiones SRSR sería renombrada posteriormente como SPIDR (acrónimo inglés de «repeticiones directas intercaladas por espaciadores») por Jan D. A. van Embden y Leo M. Schouls, del Instituto Nacional de Salud Pública y Protección Ambiental de Holanda, y por Wim Gaastra y Ruud Jansen, de la Universidad de Utrecht. Finalmente, estos mismos autores acordaron con nuestro grupo utilizar las siglas CRISPR, tan solo unos meses antes de que publicaran un artículo (encabezado por Jansen) donde identificaban cuatro familias de genes que denominaron genéricamente *cas*, seguido de un número (del 1 al 4).

Los genes *cas* estaban localizados invariablemente junto a las regiones CRISPR, lo que sugería que existía una relación funcional entre ambos elementos. La similitud de la secuencia genética responsable de algunas de las proteínas Cas con la de otras implicadas en el metabolismo del ADN o en la expresión génica llevó a Jansen y sus colaboradores a plantear que podrían intervenir en esas mismas funciones. Años más tarde, el grupo de Karen E. Nelson, en el Instituto de Investigación Genómica de Estados Unidos, describiría hasta 45 familias de proteínas Cas, y definiría varios subtipos de sistemas CRISPR-Cas, los cuales se

podían distinguir claramente a partir de la identificación de los genes situados cerca de las regiones CRISPR-Cas.

LA FUNCIÓN DE CRISPR, IDENTIFICADA

Sin duda, la determinación de los genes asociados a las CRISPR, junto con la predicción de que las proteínas Cas presentarían una actividad relacionada con los ácidos nucleicos, aportaron una nueva fuente de inspiración para plantear y evaluar hipótesis sobre la función que desempeñarían estos sistemas.

No obstante, la clave que permitió desvelar esa incógnita vino de la mano del análisis de las agrupaciones CRISPR. En el año 2003, nuestro grupo constató, en procariotas muy dispares, que algunos de los espaciadores de las CRISPR tenían un origen exógeno. Fundamentalmente, procedían de ciertos virus y, en un menor porcentaje, de plásmidos. Según la bibliografía que consultamos, estos virus y plásmidos contenían unas secuencias, denominadas protoespaciadores, que eran idénticas a los espaciadores descritos en los procariotas y que resultaban ineficaces a la hora de infectar hospedadores potenciales que contenían el espaciador correspondiente en una región CRISPR.

Las parejas espaciador-protoespaciador resultaban incompatibles cuando se hallaban en una misma célula. En base a estas y otras consideraciones, llegamos a la conclusión de que las CRISPR, y probablemente las proteínas Cas, formarían parte de un sistema de inmunidad adquirida y heredable. Propusimos que los espaciadores, previamente adquiridos a partir de los elementos genéticos transmisibles de virus o plásmidos durante su paso por la célula, interferían de manera específica con la futura propagación de los propios virus o plásmidos. Esta «vacunación genética» era después transmitida a la descendencia y proporcionaba protección a las poblaciones de procariotas durante generaciones. Posteriormente, investigadores del laboratorio de Gilles Vergnaud, en la Universidad París XI, llegaron a conclusiones análogas tras el análisis de los espaciadores de una serie de aislados de la bacteria *Yersinia pestis*.

Medio siglo después del descubrimiento de los sistemas de restricción-modificación y de demostrar su implicación en la inmunidad innata de los procariotas, tras una década de investigaciones infructuosas, nuestro grupo disponía de datos sobre la existencia en bacterias y arqueas de un sistema ancestral de inmunidad adquirida, supuestamente guiado por moléculas de ARN transcritas a partir de las regiones CRISPR (por entonces no disponíamos de resultados experimentales que demostraran este último aspecto; lo dedujimos porque sabíamos que las agrupaciones CRISPR se transcribían y que los espaciadores determinaban la identidad de la secuencia rechazada). Corría el año 2003 y la sorprendente novedad del hallazgo, además de la falta de un trabajo experimental que respaldara la hipótesis, se topó reiteradamente con el rechazo de su publicación en revistas científicas de gran prestigio. Finalmente, a principios de 2005, presentamos nuestro trabajo sobre el sistema de inmunidad adquirida en un artículo en *Journal of Molecular Evolution*.

Las implicaciones biológicas y aplicadas del descubrimiento dentro del ámbito de la microbiología, así como su repercusión en otros campos (especialmente en el contexto de la salud, porque se vislumbró su potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades infecciosas) incentivaron la investigación sobre los sistemas CRISPR-Cas y pronto se comprobaron las conclusiones derivadas de ese artículo.

En 2007, investigadores de los laboratorios dirigidos por Sylvain Moineau, de la Universidad Laval, Dennis A. Romero, de la compañía Danisco en Estados Unidos, y Philippe Horvath, de Danisco en Francia, colaboraron en el trabajo que definitivamente demostró que al menos algunas de las proteínas Cas estaban funcionalmente asociadas con las CRISPR, y que ambos elementos conferían protección frente a virus a la bacteria láctica *Streptococcus thermophilus*.

Un año después, Luciano A. Marraffini y Erik J. Sontheimer, de la Universidad del Noroeste en Evanston (EE.UU.), comprobaron que las CRISPR de un aislado clínico de la bacteria *Staphylococcus epidermidis* interferían con la transferencia de plásmidos. También en 2008, un grupo liderado por John van der Oost, de la Universidad de Wageningen, evidenció que unas moléculas de ARN generadas a partir de las regiones CRISPR de *E. coli* actuaban como guías para reconocer las dianas (las moléculas invasoras).

Finalmente, la acción responsable de la inmunidad fue establecida en 2010 por el grupo de Moineau al estudiar uno de los sistemas CRISPR-Cas de *S. thermophilus*. Los investigadores observaron que las secuencias diana sufrían un corte muy preciso, a una distancia fija de un motivo de secuencia conservada yuxtapuesto a los protoespaciadores. Tanto la secuencia como el tamaño (entre 2 y 5 pares de bases) de este motivo, designado motivo adyacente al protoespaciador (PAM, por sus siglas en inglés) por nuestro grupo, podían variar entre sistemas CRISPR-Cas, incluso entre aquellos pertenecientes al mismo tipo.

LOS DETALLES DEL MECANISMO

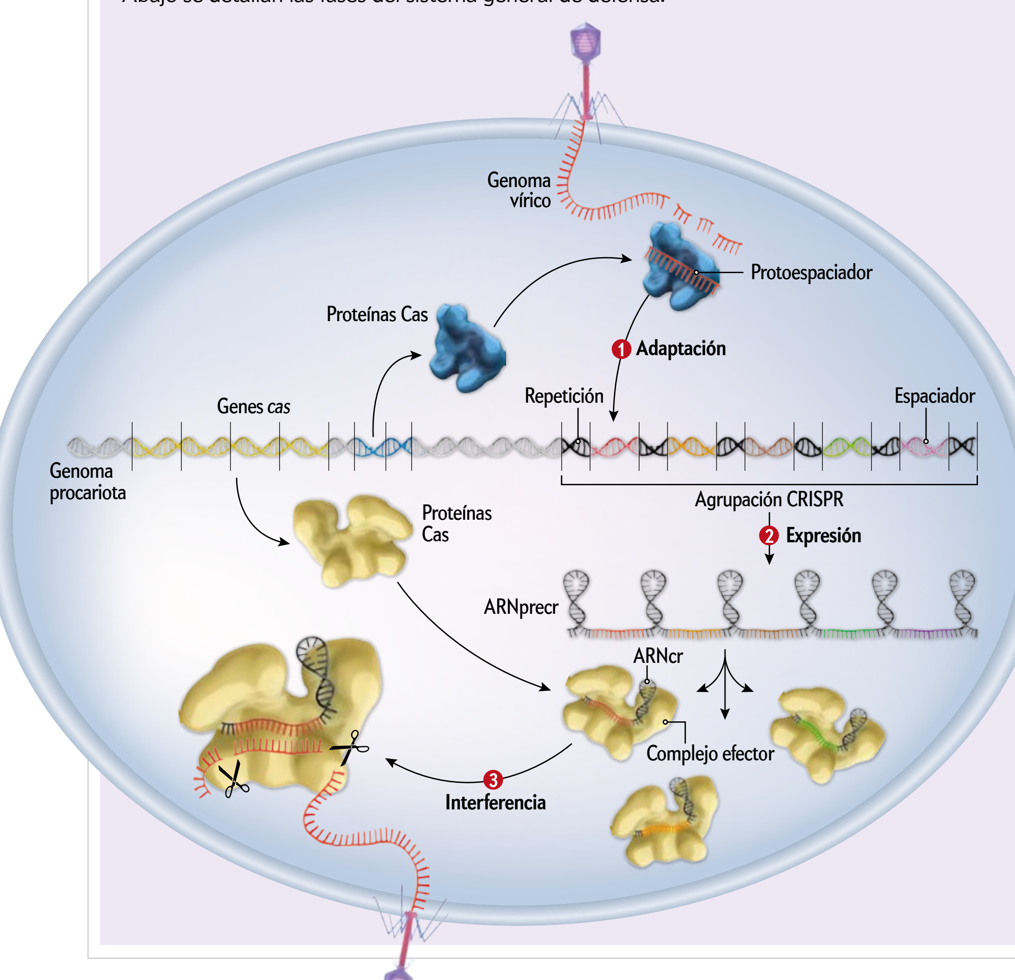
A pesar de la diversidad de sistemas CRISPR-Cas en cuanto a la identidad de los genes y de otras secuencias asociadas (CRISPR, PAM, espaciadores-protoespaciadores), y aun habiéndose establecido los aspectos arriba mencionados para microorganismos y sistemas dispares, con toda la información disponible se pudo esbozar un mecanismo general de acción. Este fue descrito en 2011 en una publicación encabezada por Kira S. Makarova, del Centro Nacional para la Información Biotecnológica, en Bethesda (Maryland), y en el que participaron unos diez grupos de investigación, entre ellos el nuestro. El mecanismo en cuestión comprende tres etapas, denominadas adaptación, expresión e interferencia, en las que intervienen de forma conjunta las CRISPR y las proteínas Cas.

La adaptación es el proceso inicial mediante el cual se insertan nuevos espaciadores en una región CRISPR, adquiridos a partir de fragmentos de un elemento genético (virus o plásmido) durante su paso por la célula. La agrupación repetición-espaciador se transcribe en la etapa de expresión, lo que genera un ARN preliminar derivado de CRISPR (ARNprecr). Este es luego sometido a digestión en puntos concretos a nivel de cada repetición y da lugar a los ARN derivados de CRISPR (ARNcr). Cada ARNcr alberga la secuencia de un solo espaciador flanqueada por fragmentos de repeticiones. En la etapa de interferencia, los ARNcr forman sendos complejos con proteínas Cas. Estos complejos ARNcr-Cas localizan secuencias de ácidos nucleicos concurrentes con la del espaciador (secuencias diana en el elemento invasor) a través del ARNcr, y mediante una proteína Cas con actividad endonucleasa producen un corte en la diana (el elemento invasor).

Existen, sin embargo, numerosos detalles de este mecanismo que varían según el tipo de sistema CRISPR-Cas concreto, tales como la naturaleza del ácido nucleico diana (ARN, ADN o ambos), el requerimiento de motivos PAM específicos o la clase de corte (de doble cadena, de cadena sencilla, único o múltiple) y la proteína Cas implicada. En al menos algunos sistemas, el corte inicial promueve la adquisición de espaciadores procedentes

Así funciona CRISPR-Cas

En su estrategia defensiva, el procariota (bacteria o arquea) incorpora primero en su genoma material genético del virus que le ataca. Ello funciona como una suerte de inmunización, o «vacunación», que le permitirá responder y neutralizar futuras invasiones del mismo virus. El procariota va acumulando en las agrupaciones CRISPR un registro de los sucesivos virus que le atacan. Contra ellos podrá defenderse más tarde, lo que constituye una inmunidad adquirida que podrá transmitir también a su descendencia. Abajo se detallan las fases del sistema general de defensa:



1 Adaptación. Cuando un virus ataca por primera vez a un procariota, un complejo de proteínas Cas (*azul*) de esta transfiere un fragmento (protoespaciador) del ácido nucleico vírico a un extremo de la agrupación CRISPR. En este proceso, que implica la duplicación de la repetición adyacente, se genera un nuevo espaciador.

2 Expresión. La agrupación CRISPR se transcribe y da lugar a un ARN precursor (ARNprecr). Este es procesado en moléculas de ARN derivadas de CRISPR (ARNcr), constituidas por la secuencia de un solo espaciador (*varios colores*) y fragmentos de las repeticiones adyacentes (*negro*), las cuales se unen a otras proteínas Cas (*amarillo*) para formar complejos efectores.

3 Interferencia. En un ataque futuro del mismo virus, un complejo efector se une, a través del espaciador, a una secuencia vírica complementaria. Ello provoca que la proteína Cas asociada corte el ácido nucleico del virus, con lo que se impide su proliferación.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

de la molécula dañada, con lo que se inicia un nuevo ciclo de inmunización. El resultado final es la inactivación del elemento genético portador de la diana, a menos que los cortes infligidos sean reparados por algún mecanismo ajeno a CRISPR-Cas. De esta manera, la actividad CRISPR puede dar lugar a la destrucción de un plásmido o del genoma de un virus invasor.

LOS INCONVENIENTES DE LA INMUNIDAD

Tal y como ocurre con el sistema de inmunidad adquirida de los vertebrados, la acción de CRISPR causa efectos indeseados. Además de sobre el material genético exógeno, los CRISPR-Cas pueden actuar sobre el genoma residente, con unas consecuencias que van desde la generación de mutaciones hasta la muerte celular.

Por otro lado, crear barreras a la entrada de material genético conlleva sus desventajas, ya que los procariotas se benefician en numerosas ocasiones de la incorporación de ADN importado del exterior. Por ejemplo, los plásmidos albergan con frecuencia información que confiere a las bacterias resistencia a los antimicrobianos o les permite utilizar fuentes alternativas de nutrientes.

Incluso la infección por algunos virus puede resultarle ventajosa al hospedador. Antes de la formación y liberación de las partículas víricas, el genoma de determinados virus puede permanecer en la célula durante generaciones, sin causar un perjuicio aparente a los portadores. Durante ese período, se expresa parte de la información genética del virus, pudiendo afectar a las características y capacidades de la célula procariota a distintos niveles. Un ejemplo notable de las repercusiones de esta infección vírica latente puede tener lugar en las bacterias patógenas: la producción de factores codificados por el virus incrementa la probabilidad de supervivencia de la bacteria y, como consecuencia, de su capacidad patogénica.

Los inconvenientes de la acción de CRISPR explican que algunas bacterias posean un mecanismo encargado de evitar que un sistema CRISPR-Cas procedente del exterior se instaure en la célula, que un elevado porcentaje de procariotas carezca de

dichos sistemas, y que su actividad suela estar sometida a una regulación muy estricta que, generalmente, permanece reprimida.

El silenciamiento de los CRISPR-Cas es una de las razones por las que estos sistemas pasaron inadvertidos para los microbiólogos hasta que un cúmulo de observaciones permitió inferir su papel biológico, sin haber podido constatar actividad alguna.

UN SINFÍN DE APLICACIONES

La existencia en procariotas de un sistema de inmunidad adquirida tiene una enorme importancia biológica debido a sus consecuencias directas sobre la supervivencia de estos microorganismos, la cual, a su vez, repercute de manera fundamental en la del resto de los seres vivos.

El análisis del conjunto de los espaciadores de comunidades procariotas ha proporcionado a los investigadores una nueva herramienta para abordar multitud de incógnitas relacionadas con la ecología, evolución y dinámica de las poblaciones naturales de estos microorganismos, así como de las interacciones entre sí y con sus virus. La identidad de los espaciadores, y su variación entre aislados de una misma especie, se utiliza además en la identificación de bacterias, principalmente las patógenas, por ejemplo, para establecer el origen de brotes epidémicos.

Por otro lado, la sencillez molecular del mecanismo de inmunidad CRISPR permite su fácil manipulación en los hospedadores naturales con diversos fines, tales como su reprogramación para dirigirlos contra elementos genéticos concretos. Esto puede conseguirse con tan solo proporcionarle a la célula espaciadores que coincidan con una secuencia del elemento genético elegido.

De esta manera, los investigadores han modificado bacterias que se utilizan rutinariamente para la elaboración industrial de alimentos, como yogures o quesos. Con ello consiguen hacerlas resistentes a la infección por virus que con frecuencia las atacan durante el proceso de producción. Se ha planteado incluso la posibilidad de diseñar CRISPR contra plásmidos que contienen genes de resistencia frente a antibióticos, lo cual permitiría interferir con la diseminación de dichas resistencias en poblaciones bacterianas. Además, se han transferido sistemas CRISPR-Cas completos a procariotas carentes de ellos, con lo que se los ha dotado de una inmunidad eficaz. Por último, se ha comprobado la eficacia de emplear componentes CRISPR programados para actuar contra secuencias exclusivas del genoma de cepas patógenas. Al administrarlos a poblaciones bacterianas mixtas, destruyen de manera específica a las patógenas, portadoras de dichas dianas. Este uso abre la posibilidad de desarrollar una nueva generación de antimicrobianos selectivos que no afecten a los procariotas que habitan en nuestro organismo y que nos confieren multitud de beneficios.

Aparte de su empleo en bacterias, los componentes de los sistemas CRISPR-Cas han dado lugar a la implementación de un arsenal de estrategias de biología molecular capaces de actuar sobre material genético purificado (in vitro) o en el interior de células eucariotas, tanto aisladas (ex vivo) como aquellas que forman parte de un organismo (in vivo).

La así denominada técnica CRISPR permite modificar (eliminar, corregir, reemplazar, relocalizar) la información genética, controlar la expresión de los genes o detectar y visualizar regiones concretas de un genoma, todo ello con una facilidad y precisión sin precedentes.

El impulso que han proporcionado estas herramientas a la investigación biológica en sus diversos campos es extraordinario, ya que facilitan la tarea de identificación de la función de elementos genéticos y su implicación en el desarrollo del organismo, la diferenciación celular, el envejecimiento, la vulnerabilidad a las infecciones o el origen y evolución de las enfermedades, tanto en plantas como en animales, incluidos los humanos. El uso de estas técnicas está generando grandes expectativas para la prevención y tratamiento de enfermedades de diversa índole, que van desde la infección por virus hasta procesos cancerígenos o trastornos neurodegenerativos.

El descubrimiento del sistema de inmunidad innata R-M de los procariotas nos proporcionó las enzimas de restricción, una herramienta que permite construir combinaciones precisas de material genético y que supusieron una revolución en biología molecular, el inicio de la ingeniería genética. Después, el descubrimiento de la inmunidad adaptativa mediante CRISPR-Cas ha dado lugar a una nueva generación de técnicas de laboratorio tremendamente versátiles. Están contribuyendo al conocimiento de los seres vivos como ningún otro y, con ello, a solucionar problemas anteriormente inabordables.

Los sistemas CRISPR-Cas son un ejemplo remarcable de la enorme recompensa de la investigación básica en general y, en particular, del estudio de los organismos microscópicos, omnipresentes, imprescindibles, sorprendentes; los primeros en habitar la Tierra y, si se diera el caso, los últimos en despoblarla. Conocerlos, aprender de ellos, ha beneficiado y seguirá beneficiando de manera notable a la humanidad.

PARA SABER MÁS

Transcription at different salinities of *Haloferax mediterranei* sequences adjacent to partially modified PstI sites. Francisco J. M. Mojica, Guadalupe Juez y Francisco E. Rodríguez-Valera en *Molecular Microbiology*, n.º 9, págs. 613-621, 1993.

CRISPR-Cas systems. RNA-mediated adaptive immunity in bacteria and archaea. Dirigido por Rodolphe Barrangou y John van der Oost. Springer Verlag, Berlín-Heidelberg, 2013.

An updated evolutionary classification of CRISPR-Cas systems. Kira S. Makarova et al. en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 13, n.º 11, págs. 722-736, noviembre de 2015.

The heroes of CRISPR. Eric S. Lander en *Cell*, vol. 164, n.os 1-2, págs. 18-28, enero de 2016.

On the origin of CRISPR-Cas technology: From prokaryotes to mammals. Francisco J. M. Mojica y Lluis Montoliu en *Trends in Microbiology*, vol. 24, n.º 10, págs. 811-820, octubre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La edición genética, más precisa. Margaret Knox en *IyC*, febrero de 2015.
CRISPR llega a los cultivos. Stephen S. Hall en *IyC*, septiembre de 2016.
Modificar nuestra herencia. Stephen S. Hall en *IyC*, noviembre de 2016.



Fuentes de vida.

QUÍMICA

El océano profundo se consideraba el escenario donde se originó la vida. Sin embargo, nuevos indicios apuntan hacia zonas volcánicas terrestres activas

Martin J. Van Kranendonk, David W. Deamer y Tara Djokic



CUNA TERMAL: La vida en la Tierra podría haberse originado en lugares similares a la Gran Fuente Prismática del Parque Nacional de Yellowstone.

Es noche cerrada. Nos hemos abierto paso entre la densa maleza, en el noroeste de Australia, guiados únicamente por la tenue luz de la pantalla de un GPS. Su brillo es demasiado débil para iluminar los árboles caídos sobre el cauce seco del arroyo que estamos recorriendo, y nos tropezamos con ellos continuamente. Somos dos geólogos trabajando, en junio de 2014, en una región remota del país llamada Pilbara: Djokic, al frente, y Van Kranendonk, unos pasos más atrás. Aparcada en medio de un pequeño altiplano, nuestra camioneta parece quedar a un mundo de distancia. No sabemos si las baterías de nuestros GPS durarán lo suficiente como para mostrarnos el camino de vuelta.

Martin J. Van Kranendonk es director del Centro Australiano de Astrobiología de la Escuela de Ciencias Biológicas, Geológicas y Medioambientales de la Universidad de Nueva Gales del Sur. Durante más de 30 años ha dirigido investigaciones relacionadas con rocas extremadamente antiguas de todo el planeta.

David Deamer es profesor del Departamento de Ingeniería Biomolecular de la Universidad de California en Santa Cruz. Su trabajo como autor o editor abarca 12 libros, entre ellos *The origins of life* (2010), coeditado por Jack W. Szostak, y *First life* (2011).

Tara Djokic es estudiante de doctorado en el Centro Australiano de Astrobiología de la Universidad de Nueva Gales del Sur. En su proyecto combina observaciones geológicas de pruebas tempranas de vida en el oeste de Australia con técnicas de realidad virtual.

El hecho de que nos abramos paso de noche en Pilbara se debe a que hemos pasado el día cautivados por el nuevo hallazgo realizado por Djokic en unas rocas sedimentarias de 3480 millones de años conocidas como la formación Dresser. Algunas de esas rocas están compuestas por unas capas onduladas blancas y anaranjadas denominadas geiseritas, creadas por acción de un géiser volcánico superficial. En ellas se observan unas burbujas formadas por gas que quedó atrapado en el interior de una película pegajosa producida probablemente por una fina capa de microorganismos similares a bacterias. Las rocas superficiales y los indicios de biopelículas apoyan una nueva teoría sobre uno de los enigmas más antiguos del planeta: cómo y dónde comenzó la vida. Las pruebas apuntan hacia unas fuentes y pozas termales volcánicas de hace unos 3500 millones de años situadas en terreno continental.

La hipótesis supone una versión del origen de la vida muy distinta a lo postulado por los científicos desde 1977. Ese año, el submarino de investigación *Alvin* descubrió unas chimeneas hidrotermales en el fondo del océano Pacífico por las que emanaban minerales de hierro y azufre y algunos gases, como metano y sulfuro de hidrógeno. En torno a las estructuras florecía un rico ecosistema de bacterias primitivas y gusanos de gran tamaño. Desde entonces, los biólogos han sostenido que tales chimeneas, resguardadas de los cataclismos que azotaban la superficie terrestre hace unos 4000 millones de años, podrían haber aportado la energía, los nutrientes y el ambiente seguro necesarios para que se originara la vida. Pero esa teoría plantea una serie de problemas. El mayor de todos radica en la gran cantidad de agua que contiene el océano, donde las moléculas necesarias se diluirían demasiado rápido como para poder interactuar entre sí, y formar membranas celulares y desarrollar un metabolismo primitivo.

Tanto nosotros como otros científicos consideramos hoy que las pozas de aguas termales que se secan y se inundan repetidamente podrían suponer unos lugares más apropiados. Su calor interno cataliza reacciones y en ellas se suceden una serie de intervalos: por un lado, unos episodios secos en los que las unidades más simples pueden formar unas moléculas más complejas llamadas polímeros y, por otro, unos estadios húmedos en los que tales polímeros flotan en el agua. Posteriormente, en un nuevo episodio seco, los polímeros quedan aislados en diminutas cavidades donde pueden interactuar e incluso concentrarse en compartimentos formados por ácidos grasos, los prototipos de las membranas celulares.

Djokic había hallado pruebas geológicas sólidas de que la formación Dresser, actualmente un entorno yermo, seco y cálido del interior, fue similar a las humeantes fuentes termales y los géiseres en erupción del Parque Nacional de Yellowstone, EE.UU., un activo campo geotermal. Y en toda la formación se aprecian signos de vida fosilizados, íntimamente asociados con el antiguo sistema de aguas termales. Si bien la formación no representa el verdadero lugar donde se originaron, 500 millones de años atrás, la mayoría de las formas de vida más primitivas, sí indicaba que los ambientes hidrotermales terrestres ya estaban presentes en los estadios primigenios de la historia del planeta. En 1871, Charles Darwin había sugerido que la vida microbiana se había originado en «un pequeño charco de agua templada». Hoy, una serie de científicos de distintas disciplinas consideran que el autor de *El origen de las especies* había dado intuitivamente con una idea fundamental. Por otro lado, las implicaciones de dicha

EN SÍNTESIS

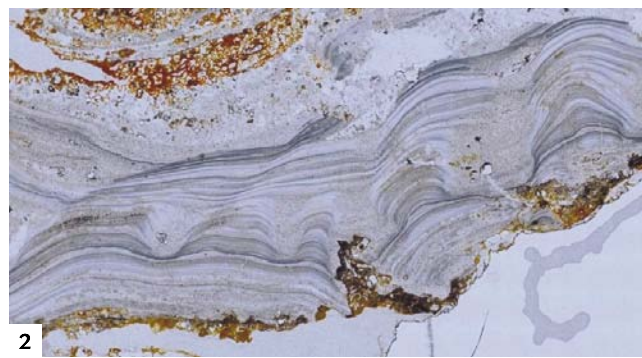
Para originarse, la vida en la Tierra necesitó energía para crear moléculas complejas y un medio para que estas se aproximaran entre sí.

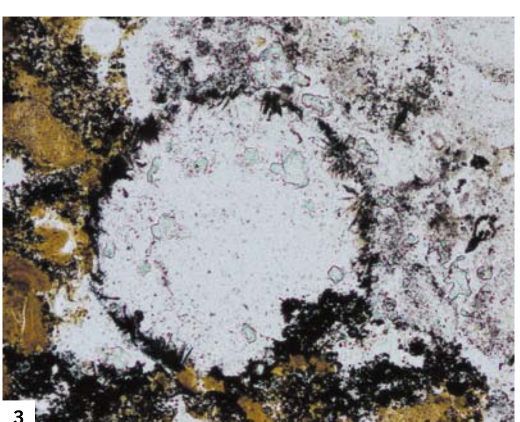
Los sistemas de fuentes termales de origen volcánico situados en terreno continental presentan los ingredientes necesarios para originar la vida, así como una sucesión de ciclos húmedos y secos que facilitan la interacción y la selección natural.

Una teoría basada en un dominio volcánico terrestre, a diferencia de una centrada en un ambiente oceánico, nos lleva a buscar vida en distintos lugares del sistema solar.

PÁGINAS ANTERIORES: WERNER VAN STEEN, GETTY IMAGES







VIDA EN LAS ROCAS: Las rocas de color anaranjado de la región australiana de Pilbara se denominan geiseritas y se componen de minerales depositados a partir del agua salpicada por géiseres en una zona de fuentes termales (*1*). Las rocas muestran al microscopio unas características bandas oscuras ricas en titanio y otras de color claro mayormente compuestas de potasio (un centímetro de ancho) (*2*). Las minúsculas burbujas preservadas en esta antigua geiserita de 3500 millones de años se formaron en el interior de biopelículas generadas por microorganismos (*3*).

teoría van más allá de nuestro planeta: en nuestra búsqueda de vida extraterrestre en el sistema solar, una teoría terrestre sobre el origen de la vida podría guiarnos hacia lugares y planetas distintos a los que nos dirigiría una teoría oceánica.

DESDE RUSIA CON VIDA

Diez años antes de nuestra excursión nocturna con el GPS en Pilbara, otro de nosotros (Deamer) había demostrado que los manantiales volcánicos podían alojar compartimentos formados por membranas, las barreras esenciales de cualquier forma de vida celular. Deamer dirigió un equipo de científicos en el Mutnovsky, un volcán activo situado en la península de Kamchatka, en el extremo oriental de Rusia. El grupo estudiaba un terreno análogo a un lugar prebiótico, una región que pudiera dar una idea a los científicos sobre el aspecto que tenía el planeta hace 4000 millones de años, antes de que se originara la vida. Deamer sostenía que, al exponerse a los ciclos secos y húmedos que caracterizan las fuentes termales continentales, los elementos moleculares simples podían unirse para formar polímeros más largos capaces de transportar información, como los ácidos nucleicos, necesarios para que la vida primitiva se desarrollara y se replicara. Otros polímeros fundamentales, los péptidos, podrían generarse a partir de aminoácidos en las mismas condiciones. Y, lo que es más importante, los lípidos, otros de los constituyentes fundamentales, podrían combinarse y formar compartimentos microscópicos donde alojar y proteger los polímeros y la información que contienen. La vida necesitaría todos los compuestos para originarse, y el volcán Mutnovsky disponía de abundantes fuentes termales y géiseres en los que poder verificar la hipótesis.

Deamer había llevado consigo una botella con un polvo blanco en su interior. Correspondía a la hipotética materia prima de la Tierra prebiótica, compuesta por cuatro aminoácidos, cuatro bases nitrogenadas (constituyentes de los ácidos nucleicos naturales), fosfato, glicerol y un tipo de lípido. Vertió la mezcla en el centro de una fuente termal hirviente y, al cabo de unos minutos, se originó en el borde una espesa espuma formada por innumerables vesículas diminutas, cada una de las cuales contenía los compuestos que había en el caldo primitivo.

Si los compartimentos se secaran en los bordes de la poza termal, ¿podrían los elementos de allí, ya próximos entre sí, unirse para formar polímeros? ¿Podría ser ese el trampolín hacia las primeras formas de vida? En su laboratorio, Deamer y sus colaboradores verificaron la idea mezclando unos ácidos nucleicos simples, llamados nucleótidos, con lípidos. La mezcla se sometió a ciclos de humidificación y secado en las condiciones ácidas y de alta temperatura que presentaba la poza de Kamchatka. Como resultado, obtuvieron unos polímeros más largos, cuya longitud oscilaba entre 10 y más de 100 nucleótidos. Los análisis posteriores con difracción de rayos X demostraron que tales moléculas se asemejaban al ácido ribonucleico, o ARN. Comprobaron también que quedaban encapsuladas por los lípidos y formaban así un enorme número de compartimentos microscópicos llamados protocélulas. Aunque no estaban vivas, suponían claramente un importante paso hacia la vida.

Aplicando un reducido número de ciclos de humedad y secado en sus experimentos, Deamer obtuvo moléculas relativamente simples. Uno de sus colaboradores de la Universidad de California en Santa Cruz, el especialista en informática Bruce Damer, sospechó que un número mucho mayor de ciclos integraría otro factor fundamental: la supervivencia del más apto. Damer imaginó que cada ciclo seco causaría la apertura de las membranas lipídicas de las vesículas, lo que permitiría que se mezclaran los polímeros con los nutrientes. Al volver a humedecerse, las membranas volverían a encapsular otras mezclas de polímeros, de forma que cada una de ellas representaría un tipo distinto de experimento natural. Las protocélulas más complejas tendrían más probabilidades de sobrevivir dado que su mayor variedad de mezclas moleculares podría estabilizarlas en distintas situaciones: un conjunto de moléculas resultaría favorable en ciertas condiciones, mientras que otro lo sería en otras. Esas protocélulas sobrevivirían y transmitirían sus conjuntos de polímeros a la siguiente generación, con lo que lograrían ascender en la cadena evolutiva. Damer se dio cuenta de que el

CORTESÍA DE MARTIN J. VAN KRANENDONK

modelo se asimilaba a una especie de ordenador químico que «iniciaría» las funciones vitales a partir de «programas» aleatorios escritos en forma de polímeros.

En 2015, Damer añadió una tercera fase a las dos del ciclo: un estadio intermedio entre húmedo y seco. La idea surgió durante un viaje de investigación con los coautores a la formación Dresser en busca de estromatolitos, las capas fosilizadas de tapices bacterianos que conforman una de las huellas más antiguas de vida en la Tierra. Mientras caminaba por el desierto cerca de un afloramiento de granito conocido como Gallery Hill, un lugar con abundantes petroglifos (imágenes grabadas en las rocas por los aborígenes), Damer se fijó en unas capas microbianas secas de color marrón, situadas en unas pequeñas depresiones de los afloramientos. Por curiosidad, vertió agua en las capas y estas cobraron vida: se volvieron verdes y adoptaron una textura de gel. El científico se imaginó que si los ciclos húmedos y secos ocurridos en una fuente termal donde se gestara la vida incluyeran también una fase de humidificación en la que las protocélulas supervivientes se aglomeraran estrechamente en un gel similar, los polímeros y las moléculas nutrientes podrían mezclarse e intercambiarse a través de las barreras formadas por membranas lipídicas. Esa comunidad de protocélulas colaboradoras tendrían todavía más oportunidades de hallar las mejores moléculas con las que sobrevivir. Cuarenta años antes, de hecho, los científicos George Fox y el fallecido Carl Woese propusieron el término «progenota» para designar esa fase primordial comunal de la vida; Fox le contó a Damer que la idea casaba con su gel protocelular.

FUENTES DE INNOVACIÓN

Las burbujas y la composición mineral halladas por Djokic en la formación Dresser la convertían en un lugar donde podía tener lugar el ciclo de tres fases y publicamos las pruebas en mayo del presente año en *Nature Communications*. Al observar que la formación había contenido manantiales de agua caliente asociados a un sistema geotermal, dedujimos que también había alojado muchos de los ingredientes fundamentales y de las estructuras organizativas requeridos para el origen de la vida. Los fluidos hidrotermales circulantes, ricos en hidrógeno y calentados por el magma que se hallaba debajo, constituían la fuente de energía. Las rocas contenían abundantes cantidades del elemento boro, un ingrediente crucial en la síntesis de la ribosa, necesaria para formar ácidos nucleicos como el ARN. La formación presenta también minerales fosfáticos que se disuelven de las rocas subyacentes y se incorporan en los fluidos geotérmicos ácidos que circulan. Por un lado, el fosfato es un componente esencial de los ácidos nucleicos; por otro, lo emplean todas las formas de vida en forma de ATP (adenosín trifosfato, la molécula que proporciona energía en las células). Por otra parte, la formación era rica en zinc y manganeso, componentes de muchas de las enzimas presentes en el citoplasma celular de todas las formas de vida halladas en chimeneas hidrotermales y en depósitos lacustres volcánicos de ambientes evaporíticos. Por último, en la formación también había arcillas, que pueden actuar como catalizadores en la síntesis de moléculas orgánicas complejas debido a la carga eléctrica que exhiben las capas superficiales de los minerales que contienen.

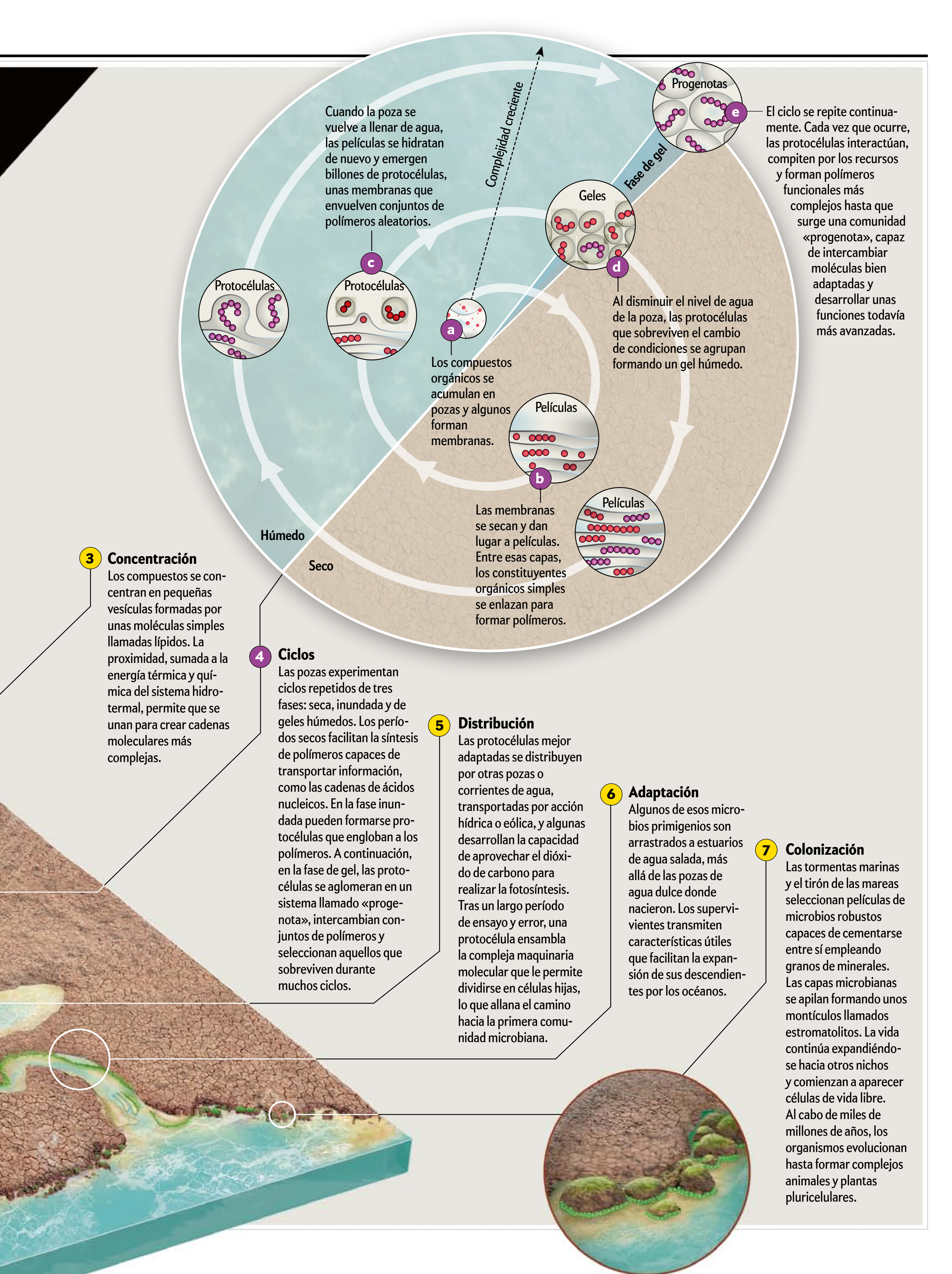
HIPÓTESIS

Geografía del origen

Según una nueva teoría, las fuentes termales y los géiseres pueden activar los sistemas químicos necesarios para que se origine la vida en la Tierra. Las condiciones dan inicio a un proceso de siete pasos que comienza con una síntesis química, pasa a continuación por una serie de ciclos de creciente complejidad y finaliza con la colonización de un nuevo territorio.



ILUSTRACIÓN DE JOSÉ MIGUEL MAYO (*geografía*) Y JEN CHRISTIANSEN (*ciclos*)



Progenotas
e
El ciclo se repite continuamente. Cada vez que ocurre, las protocélulas interactúan, compiten por los recursos y forman polímeros funcionales más complejos hasta que surge una comunidad «progenota», capaz de intercambiar moléculas bien adaptadas y desarrollar unas funciones todavía más avanzadas.
Complejidad creciente
Fase de gel
Cuando la poza se vuelve a llenar de agua, las películas se hidratan de nuevo y emergen billones de protocélulas, unas membranas que envuelven conjuntos de polímeros aleatorios.
c
Protocélulas
Protocélulas
Geles
d
Al disminuir el nivel de agua de la poza, las protocélulas que sobreviven el cambio de condiciones se agrupan formando un gel húmedo.
a
Los compuestos orgánicos se acumulan en pozas y algunos forman membranas.
Películas
b
Las membranas se secan y dan lugar a películas. Entre esas capas, los constituyentes orgánicos simples se enlazan para formar polímeros.
Películas
Húmedo
Seco
3 Concentración
Los compuestos se concentran en pequeñas vesículas formadas por unas moléculas simples llamadas lípidos. La proximidad, sumada a la energía térmica y química del sistema hidrotermal, permite que se unan para crear cadenas moleculares más complejas.
4 Ciclos
Las pozas experimentan ciclos repetidos de tres fases: seca, inundada y de geles húmedos. Los períodos secos facilitan la síntesis de polímeros capaces de transportar información, como las cadenas de ácidos nucleicos. En la fase inundada pueden formarse protocélulas que engloban a los polímeros. A continuación, en la fase de gel, las protocélulas se aglomeran en un sistema llamado «progenota», intercambian conjuntos de polímeros y seleccionan aquellos que sobreviven durante muchos ciclos.
5 Distribución
Las protocélulas mejor adaptadas se distribuyen por otras pozas o corrientes de agua, transportadas por acción hídrica o eólica, y algunas desarrollan la capacidad de aprovechar el dióxido de carbono para realizar la fotosíntesis. Tras un largo período de ensayo y error, una protocélula ensambla la compleja maquinaria molecular que le permite dividirse en células hijas, lo que allana el camino hacia la primera comunidad microbiana.
6 Adaptación
Algunos de esos microbios primigenios son arrastrados a estuarios de agua salada, más allá de las pozas de agua dulce donde nacieron. Los supervivientes transmiten características útiles que facilitan la expansión de sus descendientes por los océanos.
7 Colonización
Las tormentas marinas y el tirón de las mareas seleccionan películas de microbios robustos capaces de cementarse entre sí empleando granos de minerales. Las capas microbianas se apilan formando unos montículos llamados estromatolitos. La vida continúa expandiéndose hacia otros nichos y comienzan a aparecer células de vida libre. Al cabo de miles de millones de años, los organismos evolucionan hasta formar complejos animales y plantas pluricelulares.

Viaje al pasado

Cuando puse un pie por primera vez en la región australiana de Pilbara, un terreno donde se hallan indicios sobre el origen de la vida datados en 3500 millones de años, me llevé una desilusión. Era 1994. Había salido emocionado con mi coche de Port Hedland, una ciudad costera del oeste, pero lo único que encontré durante los primeros 150 kilómetros fueron árboles marchitos y torbellinos deambulando por la ardiente llanura. Me sentía desolado. ¿Dónde me había metido? ¡Y qué calor hacía! Nunca había vivido una experiencia tan extrema. Ni había respirado un aire tan espeso lleno de moscas que picaban.

Pero cuando continuamos hacia el sur siguiendo la autopista hacia Marble Bar, la ciudad más cálida de Australia, comenzaron a despuntar en el horizonte unas amplias colinas. Empezamos a cruzar arroyos y ríos arenosos, entre ellos el impetuoso río Shaw, cuyas riberas estaban adornadas con exuberantes *Eucalyptus coolabah* y sus distintivos troncos blancos y brillantes.

A medida que nos adentramos en las colinas por un camino polvoriento, las tórridas llanuras dieron paso a unos montículos cubiertos de una herbácea llamada *Spinifex*, una planta tan asombrosa como diabólica. Forma unas matas que alcanzan hasta un metro de diámetro y está dotada de unas finas hojas que terminan en unas afiladas agujas compuestas casi únicamente de sílice. Las puntas pueden atravesar casi cualquier tipo de tejido. Mi supervisor sacó unas polainas para proteger sus piernas, pero a mí no me había advertido del peligro. Al cabo de unos minutos caminando sin polainas, parecía un puercoespín andante, con miles de agujas de sílice clavadas en mi piel; después se rompieron y siguieron dentro de la carne durante meses.

El terreno, finalmente, demostró que las incomodidades merecían la pena. Allí estaba yo, caminando por unas de las rocas más antiguas y mejor preservadas de la Tierra, unas rocas que contienen unos registros de vida que se remontan prácticamente al inicio de los tiempos de nuestro planeta. Al observar las estructuras arrugadas que descansaban sobre los *ripples* (pequeñas ondulaciones) de antiguos sedimentos, me di cuenta de que estaba examinando los restos de seres ancestrales, los precursores de toda la vida compleja en la Tierra.



¿CUNA DE LA VIDA? La región australiana de Pilbara, ahora seca, albergó en el pasado fuentes termales y géiseres.

Esta región ha cambiado mucho desde que se formara hace 3500 millones de años. Entonces consistiría en un terreno volcánico negro carente de vegetación. Desde las colinas podría haber contemplado un océano verdoso rico en hierro bajo un cielo anaranjado cargado de dióxido de carbono y pobre en oxígeno. Cerca de allí encontraría campos de fuentes termales donde comenzaría a distinguir algo de color. Habría bandas de color blanco, amarillo y rojo alrededor de barros burbujeantes y géiseres en erupción, los colores del azufre, la arcilla y el hierro. Y en algunos charcos y canales quizá se apreciaran otras bandas de color beige, rojo y morado: colonias de microbios con afinidad por el calor y la química. Tal vez incluso se distinguieran zonas verdes de organismos fotosintéticos primigenios.

Si pudiera montarme en una máquina del tiempo y viajar miles de millones de años, vería Pilbara enterrada bajo kilómetros de lavas volcánicas y sedimentos; vería las masas de tierra moverse por la superficie del globo, chocar contra otros fragmentos de corteza y formar cinturones montañosos. Hace unos 2500 millones de años vería el océano llenarse de vida y las zonas costeras someras estarían dominadas por inmensos arrecifes construidos por cianobacterias, unos microbios primitivos que originan formaciones laminadas llamadas estromatolitos. El cielo se volvería azul a medida que las cianobacterias fotosintetizadoras absorbieran el carbono y expulsaran oxígeno hacia la atmósfera. Casi dos mil millones de años después, el mundo se enfriaría y quedaría cubierto por una capa de hielo que borraría de la superficie a casi todos los seres vivos. Al fundirse, la concentración de oxígeno volvería a incrementarse. La vida, entonces, continuaría adelante. Poco a poco, los animales y unos nuevos tipos de plantas colonizarían la tierra. Comenzaría el enverdecimiento de nuestro planeta y aparecería una amplia variedad de organismos, entre otros la *Spinifex*, para mi desgracia. —*M.J.V.K.*

Quizá lo más interesante de la formación Dresser como análogo del lugar donde se originó la vida resida en su asombrosa variedad, ya que en nuestra disciplina científica la clave se halla en la diversidad. En la actualidad, la formación es seca y rocosa, pero, en su juventud, los campos geotermales suelen presentar varios centenares de pequeños cuerpos de agua que muestran ligeras oscilaciones en su pH, temperatura, contenido en iones disueltos y otros parámetros químicos. La elevada complejidad química de los campos geotermales se debe a que cuentan con tres tipos de superficies de contacto altamente reactivas: entre agua y roca, entre agua y aire, y entre roca y aire. Además, los campos también presentan diferentes temperaturas en distintos puntos. Consideremos los siguientes factores: los ciclos húmedos y secos que se repiten numerosas veces al día (pensemos en el géiser Old Faithful de Yellowstone); la variabilidad química de las pozas termales; sus superficies de contacto altamente reactivas; su capacidad para intercambiar compuestos a medida que los géiseres expulsan su contenido; y un sistema de fracturas subterráneas interconectadas por donde circulan los fluidos. Si los sumamos todos, tendríamos que un campo geotermal terrestre con un centenar de fuentes puede generar un millón o más de nuevas combinaciones de condiciones cada año.

Cada poza de agua caliente se convierte en una «fuente de innovación», un banco de pruebas en el que aparecen rápidamente combinaciones de moléculas que hallan el modo de agregarse y reproducirse, pero también otras que se quedan en el camino, incapaces de prosperar. Probablemente se requirió un inmenso número de combinaciones para formar la primera versión primitiva de la vida. En tal caso, el proceso habría llevado varios cientos de millones de años. Pero el número de combinaciones en los campos geotermales continentales indica que la vida pudo originarse y comenzar a evolucionar en tan solo 10 millones de años, de forma que las fases iniciales surgirían tan pronto como se hubiera formado una corteza terrestre estable con masas

THEO ALLOFS, GETTY IMAGES

continentales volcánicas separadas por océanos, hace más de 4000 millones de años.

AIREANDO DESACUERDOS

No toda la comunidad científica coincide en que las fuentes termales continentales fueron los lugares donde con mayor probabilidad se originó la vida. La hipótesis de las chimeneas hidrotermales en el océano profundo sigue viva y coleando. En el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, el bioquímico Mike Russell ha retomado el descubrimiento original del submarino *Alvin* de las chimeneas hidrotermales y ha desarrollado un modelo alternativo y elegante, aunque todavía por demostrar. Según su planteamiento, las membranas minerales que forman los minúsculos poros en las rocas de las chimeneas separan inicialmente el agua alcalina del agua oceánica más ácida. Ello establece un gradiente de varias unidades de *p*H, similar al que se origina entre una solución de amoniaco doméstico y un vaso de zumo de naranja. El gradiente supone una forma de energía que puede aprovecharse, como hacen precisamente las células bacterianas actuales para generar el ATP que necesitan. En las chimeneas, la mezcla de gases disueltos, como el hidrógeno y el dióxido de carbono, supone otra fuente de energía. Russell y sus colaboradores han postulado que cuando el dióxido de carbono presente en el agua marina antigua se mezcló con el hidrógeno emitido por las chimeneas, la transferencia de electrones desde el hidrógeno al dióxido de carbono pudo sintetizar compuestos orgánicos más complejos. Según su teoría, los compartimentos minerales se asemejan a células y la energía proporcionada por los gradientes de *p*H y el hidrógeno podrían finalmente dar lugar al metabolismo primitivo requerido por las primeras formas de vida.

Las hipótesis sobre los campos de fuentes termales y las chimeneas hidrotermales del océano profundo presentan algunas implicaciones a largo plazo. Más allá de guiar futuras investigaciones sobre el origen de la vida en la Tierra, apuntan hacia diferentes planteamientos a la hora de buscar vida en otros planetas y sus lunas. Si la teoría del origen en chimeneas hidrotermales es correcta, los océanos congelados de Encélalo y Europa podrían ser lugares adecuados donde indagar. Pero si nuestro modelo de fuentes termales variables es el correcto, entonces es improbable que esos dominios alberguen vida.

¿Qué ocurre entonces con Marte? Si bien existen buenas pruebas de que en el pasado albergaba mares pocos profundos, hay pocos indicios de un océano global o de zonas de separación tectónica, contextos donde se generan las chimeneas hidrotermales en la Tierra. Así que, si el origen de la vida dependiera de la existencia de chimeneas, sería improbable que hubiera podido surgir en el planeta rojo. Pero, en caso de que la vida en la Tierra hubiera nacido en fuentes termales continentales, entonces también podría haberse originado en Marte, ya que el planeta contaba con los ingredientes necesarios para que existieran fuentes termales: un extendido vulcanismo y agua. De hecho, en 2008, el robot explorador *Spirit* descubrió en las colinas marcianas Columbia Hills unos depósitos de fuentes termales de 3650 millones de años, aproximadamente la misma edad que presentan nuestras fuentes termales de la formación Dresser, que han preservado muy bien las pruebas tempranas de la vida en la Tierra.

Tanto los modelos de chimeneas en el océano profundo como los de fuentes termales terrestres deben recorrer todavía un largo camino hasta que puedan considerarse correctos. El origen de la vida es como un rompecabezas compuesto por numerosas piezas, pero todavía no conocemos lo suficiente para poder colocar cada una en la posición correcta. En la formación Dresser, por ejemplo, no entendemos por qué ciertos elementos se concentraron en distintas pozas, cómo evolucionaron con el tiempo los campos geotermales o cómo interactuaron los diferentes ambientes químicos para sintetizar o degradar moléculas orgánicas. Necesitamos diseñar experimentos más avanzados de química prebiótica para estudiar en una serie de pequeños charcos templados cómo se forman las moléculas orgánicas complejas y cómo interactúan y se combinan cuando se encapsulan en membranas.

Tanto en tierra como en mar, las leyes químicas y físicas han facilitado un marco muy útil en torno a este particular rompecabezas, y los descubrimientos geológicos y químicos descritos en el presente artículo completan algunas de sus partes. Pero antes de que podamos visualizar claramente el origen de la vida, necesitamos ensamblar muchas más piezas del rompecabezas. Lo emocionante, sin embargo, es que hoy podemos vislumbrar un camino por el que dirigirnos hacia la solución. IyC

PARA SABER MÁS

A nonhyperthermophilic common ancestor to extant life forms. Nicolas Galtier et al. en *Science*, vol. 283, págs. 220-221, enero de 1999.
The onset and early evolution of life. Michael J. Russell y Allan J. Hall en *Geological Society of America Memoirs*, vol. 198, págs. 1-32, 2006.
Geological setting of Earth's oldest fossils in the ca. 3.5 Ga Dresser Formation, Pilbara Craton, Western Australia. Martin J. Van Kranendonk et al. en *Precambrian Research*, vol. 167, n.º 1-2, págs. 93-124, noviembre de 2008.
First life: Discovering the connections between stars, cells, and how life began. David Deamer. University of California Press, 2011.
Molecular and cellular fossils of a mat-like microbial community in geothermal boratic sinters. Wriddhiman Ghosh et al. en *Geomicrobiology Journal*, vol. 29, n.º 10, págs. 879-885, abril de 2012.
Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. Armen Y. Mulkidjanian et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 109, n.º 14, págs. e821-e830, abril de 2012.
Ester-mediated amide bond formation driven by wet-dry cycles: A possible path to polypeptides on the prebiotic Earth. Jay G. Forsythe en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 54, n.º 34, págs. 9871-9875, agosto de 2015.
Hydrothermal conditions and the origin of cellular life. David W. Deamer y Christos D. Georgiou en *Astrobiology*, vol. 15, n.º 12, págs. 1091-1095, diciembre de 2015.
A field trip to the archaean in search of Darwin's warm little pond. Bruce Damer en *Life*, vol. 6, n.º 2, art. 21, junio de 2016.
Earliest signs of life on land preserved in ca. 3.5 ga hot spring deposits. Tara Djokic et al. en *Nature Communications*, vol. 8, art. 15.263, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la vida. Alonso Ricardo y Jack W. Szostak en *IyC*, noviembre de 2009.
Indicios de vida en las rocas más antiguas de la Tierra. Abigail C. Allwood en *IyC*, marzo de 2017.

PSICOLOGÍA

HABLAR CONSIGO MISMO

El estudio de las conversaciones que la gente mantiene para sus adentros abre una ventana a los entresijos de la mente

Charles Fernyhough



Charles Fernyhough es catedrático de psicología en la Universidad de Durham. Su investigación está enfocada al desarrollo infantil, la memoria y las alucinaciones. Escribe obras de ficción y ensayo. Su último libro, *The voices within* (Basic Books, 2016) trata de la autoconversación.



La alarma sonó temprano. Me hallaba en la habitación de un hotel londinense, cerca de la sede central de la BBC. No había dormido bien. Mi semblante ante el espejo del baño era el de alguien pálido y un poco inquieto. Tenía razones para estar nervioso. En poco más de una hora estaría hablando en directo ante millones de oyentes en la tertulia radiofónica insignia de la BBC, *Start the week*. Cuando clavé la mirada en el espejo fui consciente de que estaba hablando en silencio, en mi cabeza. Mis palabras eran tranquilizadoras. Iban dirigidas a mí. «Relájate. Ya has estado antes en *Start the week*.» Tuve la impresión de que estaba hablándome a mí mismo, pero también que oía algo en mi interior, el susurro familiar de una voz.

Esta anécdota refleja la experiencia cotidiana: los pensamientos, las imágenes y las sensaciones que pasan por su cabeza, lector, cuando está a remojo en la bañera, picando cebolla en la cocina o esperando a que se abra la puerta en una cita importante. Cuando se le interpela acerca de ello, la gente responde que en su yo interior abunda el verbo. Los psicólogos emplean el término «habla interna» para este fenómeno en el que el individuo se dirige a sí mismo quedamente en su cabeza. Tiene un primo hermano, el «habla privada», en el que la gente se habla a sí misma de forma audible. Si uno se dice cosas como «Recuerda comprar café» o «Sigue adelante con tu plan» sin mentar palabra, está usando el habla interna; si lo entona en voz baja, recurre al habla privada.

Ambas formas de lenguaje parecen responder a variados propósitos, como la planificación y la supervisión del comportamiento, el control de las emociones y el fomento de la creatividad. Al parecer, en la edad adulta el habla interna es más común que la privada y reviste mayor interés para los psicólogos puesto que probablemente desempeña el papel principal en nuestro pensamiento. Pero también destaca por ser la más difícil de escrutar, con mucho. Cuando comencé a estudiarla en los años noventa apenas había bibliografía sobre el tema. La situación ha cambiado drásticamente desde entonces, en parte gracias a la concepción de nuevas técnicas experimentales y en parte porque ahora tenemos una noción más profunda de cómo opera, qué formas adopta y cómo estimula o ralentiza el pensamiento. De hecho, comenzamos a entrever que el habla interna esclarece algunas grandes cuestiones acerca de la mente y del cerebro.

SOLILOQUIO

Henry está tumbado sobre una esterilla con un tren de juguete en cada mano, extasiado con la ciudad imaginaria que está a punto de crear. «Primero los coches. Luego un gran tren», se dice a sí mismo. Tiene tres años. Si acude a una guardería o a una clase de preescolar en cualquier lugar del mundo verá (y oirá) algo similar. Puede resultar bulliciosa un aula de niños pensando en voz alta. Pero este fenómeno natural del habla privada infantil aporta claves importantes sobre el origen del verbo íntimo.

Los estudiosos han reflexionado durante mucho tiempo sobre el habla privada de los niños pequeños. En los años veinte del pasado siglo, el psicólogo suizo Jean Piaget propuso que este tipo de conversación íntima reflejaría la incapacidad de los más jóvenes para tomar la perspectiva de las otras personas y de adaptar el lenguaje propio al de sus oyentes. Desde ese punto de vista, el habla privada era el resultado de un fallo en la comunicación con los demás. Por eso se pensaba que a medida que el niño crecía y adquiría mayores dotes de conversación y asimilaba las perspectivas de sus oyentes acababa por desaparecer.

En los años treinta, el psicólogo ruso Lev Semyonovich Vygotski propuso otra explicación para el habla privada: los niños reutilizarían deliberadamente las palabras que habían usado antes con éxito en sus relaciones sociales. En lugar de regular la conducta de los otros, estarían adquiriendo soltura en el uso del lenguaje para controlarse a sí mismos. Las investigaciones en las décadas posteriores han confirmado la teoría de Vygotski sobre el desarrollo del habla interna y cómo llega a cumplir sus cometidos. Cuando en mis años de estudiante de psicología descubrí los escritos de Vygotski, recuerdo haber quedado impresionado por la simplicidad de su planteamiento. Daba por sentado que la teoría del desarrollo del pensamiento verbal tenía que ser complicada. Ahora bien, aunque la noción básica era clara en sí, sus ramificaciones eran bastante complejas. Vygotski estaba sugiriendo que la charla sigilosa que la gente adulta entabla

EN SÍNTESIS

La mayoría de la gente habla consigo misma, un fenómeno psicológico denominado habla interior.

Esta conversación íntima nos ayuda a planificar y regular nuestras emociones y a ser creativos, entre otras importantes funciones. Pero su estudio resulta esquivo.

En los últimos años, los psicólogos han hecho notables avances en el análisis del habla interior, en parte gracias a los estudios con técnicas de imagen médica que escudriñan el cerebro en funcionamiento.

Sus descubrimientos revelan algunas de las bases neurales de estas conversaciones privadas y arrojan luz sobre algunos misterios históricos de la mente.

PÁGINA ANTERIOR: DANIEL STOLLE

consigo misma es una versión interiorizada de las conversaciones que mantenemos con los demás en nuestra infancia. Casi un siglo después de que apuntara sus reflexiones, los investigadores del habla interna apenas hemos comenzado a desentrañar lo que significaban para la comprensión de la manera en que las palabras operan en nuestro pensamiento.

Una de las implicaciones más notorias de la teoría de Vygotski es que el habla interna debería tener la misma estructura que la conversación en voz alta, o sea, la calidad de un diálogo entre diferentes pareceres. Este concepto del pensamiento como un diálogo mental no es nuevo (se remonta por lo menos hasta Platón), pero me di cuenta de su potencial para reformular algunas de las grandes incógnitas que envuelven la inteligencia humana. Uno de esos misterios es el control: ¿de qué modo un sistema inteligente razona y pone en práctica nuevas ideas sobre cómo actuar? Un robot puede resultar muy inteligente respondiendo a lo que ocurre en su entorno, pero ¿qué hace que se geste la idea de actuar por iniciativa propia? Si hay que decirle al sistema qué debe hacer, entonces carece de una de las esencias de la inteligencia.

Lo que me entusiasma del diálogo es que es autorregulado por naturaleza propia. Cuando se conversa con otra persona no hay una tercera presente que mueva una batuta para señalarle a uno por dónde debe encauzar la charla. Tanto usted como su interlocutor se regulan mutuamente a través del proceso normal de preguntar, cuestionar, responder, asentir, y así sucesivamente. Parece que entender el habla íntima en tales términos ofrece la posibilidad de explicar por qué el pensamiento humano es abierto (no siempre dirigido hacia una meta concreta) e intrínsecamente flexible.

Sin embargo, para dialogar es preciso representar algo desde el punto de vista del interlocutor (justo el fallo de este tipo de toma de perspectiva que según Piaget explicaba el habla privada del niño pequeño). A menudo uno ignora lo que la otra persona está pensando, pero una vez que se lo figura, es preciso no olvidarlo y actualizar esa representación de su punto de vista mientras discurre la conversación. Ahora ya sabemos bastante sobre las bases neurales de dicha toma de perspectiva, gracias a los estudios de resonancia magnética funcional y a otras técnicas médicas de imagen que revelan las regiones del cerebro encargadas de ejecutar una determinada tarea.

Armados con estos conocimientos, mis colaboradores y yo hemos estado poniendo a prueba una nueva hipótesis sobre cómo se producen los diálogos mentales, en la sospecha de que intervienen las mismas zonas del cerebro involucradas en la toma de perspectiva. En un experimento con resonancia magnética funcional (RMf) dirigido por mi colega Ben Alderson-Day, de la Universidad de Durham, los participantes produjeron dos formas de habla interna mientras yacían en el escáner cerebral. Pedimos a los voluntarios que generaran algún habla interna provista de una estructura de monólogo; en otras palabras, que no involucrara un intercambio verbal entre diferentes pareceres. También les pedimos que llevaran a cabo un diálogo interior. En cada caso presentamos una situación particular como tema para el habla interior: la visita a la escuela de su niñez. Para el monólogo tenían que dar un discurso ante algunos alumnos; en el diálogo, charlar con el antiguo director del colegio.

Predijimos que ambos tipos de habla interna emplearían el sistema ordinario de lenguaje que se activa cuando se pide a la gente que inicie cualquier tipo de conversación: en concreto, zonas radicadas en el límite que separa los lóbulos frontal y temporal del hemisferio izquierdo y otra zona posterior más alejada, situada en el llamado giro superior temporal. Ahora bien, pensábamos que el diálogo interior sería especial y que activaría otras partes del cerebro conocidas por su participación en el pensamiento sobre otras mentes. Dichas regiones sostienen lo que nosotros denominamos el sistema de cognición social, cuyas funciones nos ayudan a representar los pensamientos, las creencias y los deseos del prójimo.

Los resultados confirmaron nuestras predicciones. Cuando la gente mantenía un diálogo interior, el sistema de lenguaje parecía estar trabajando en conjunción con una parte del sis-

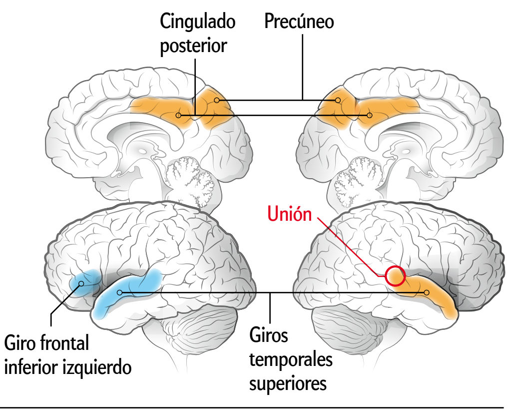
BASES NEURALES

Orígenes del habla interior

Las imágenes cerebrales de personas sumidas en la autoconversación revelan diferencias fascinantes entre los circuitos neurales que sustentan los diálogos y los monólogos interiores. Sin embargo, la interpretación de este tipo de estudios de neuroimagen demanda cautela porque el diseño experimental puede influir en los resultados: las regiones cerebrales que se activan durante el habla interior generada espontáneamente difieren de aquellas que entran en acción cuando el habla interior se produce bajo demanda.

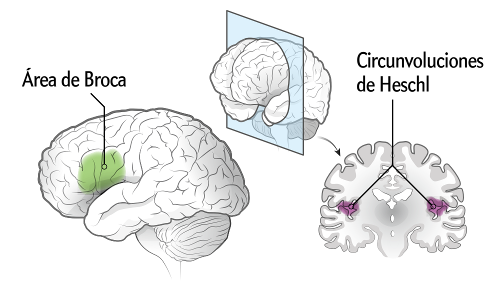
Monólogo vs. diálogo

Los estudios de RM funcional indican que el monólogo interior emplea el mismo sistema de lenguaje que se activa en cualquier tipo de habla (*azul*). Por su parte, el diálogo interno se extiende también a otras regiones neurales (*naranja*). Resulta intrigante que las áreas cerebrales que parecen estar involucradas específicamente en el diálogo interior se superpongan con una región que ha sido vinculada al pensamiento sobre la mente de los demás (*rojo*).



Repetitivo vs. espontáneo

En otro estudio de RMf los participantes a los que se pidió decirse a sí mismos ciertas palabras mostraban activación en el área de Broca, una parte del sistema de lenguaje estándar del cerebro (*verde*). En contraste, el habla interna espontánea activaba regiones posteriores más lejanas en los lóbulos temporales (*morado*).



TAMI TOLPA (*ilustración*); FUENTES: «THE BRAIN'S CONVERSATION WITH ITSELF: NEURAL SUBSTRATES OF DIALOGIC INNER SPEECH», POR BEN ALDERSON-DAY ET AL. EN *SOCIAL COGNITIVE AND AFFECTIVE NEUROSCIENCE*, VOL. 11, N.º 1, ENERO DE 2016 (*monólogo vs. diálogo*); «EXPLORING THE ECOLOGICAL VALIDITY OF THINKING ON DEMAND: NEURAL CORRELATES OF ELICITED VS. SPONTANEOUSLY OCCURRING INNER SPEECH», POR RUSSELL T. HURLBURT ET AL. EN *PLOS ONE*, VOL. 11, N.º 2, ART. E0147932; 4 DE FEBRERO DE 2016 (*repetitivo vs. espontáneo*)

tema de cognición social, localizado en el hemisferio derecho, cerca de la confluencia entre los lóbulos temporal y parietal. Los probandos no mostraban este patrón de actividad neural cuando entablaban monólogos silenciosos. Aunque es necesario que estos descubrimientos sean replicados, aportan una prueba preliminar sobre la cooperación de ambos hemisferios, entre dos sistemas que habitualmente se entiende que cumplen funciones dispares. Esta conexión nerviosa entre el lenguaje y la cognición social parece confirmar la intuición de Vygotski de que, cuando el individuo se habla a sí mismo, está manteniendo una verdadera conversación.

IN FRAGANTI

Hay sobradas razones para ser cautos a la hora de interpretar las imágenes cerebrales, sobre todo en este caso, cuando se echa por tierra lo que se daba por cierto sobre la neurociencia del habla interior. En los primeros estudios simplemente se pedía a los participantes que se repitieran frases a sí mismos en silencio, como un monólogo, sin conversación (el tipo de habla interior que uno entabla cuando vaga por los pasillos del supermercado tratando de recordar los últimos artículos de la lista de la compra). Es sumamente útil en ciertos momentos, pero dista mucho de los creativos y flexibles diálogos interiores que surgen cuando nos tratamos como partícipes en un intercambio social. Nuestro equipo de investigación ha puesto las propiedades conversacionales del habla interior en el centro de atención, pero aún pedimos a nuestros voluntarios que hagan algo bastante antinatural: hablarse a sí mismos bajo demanda en lugar de esperar que el habla interior brote espontáneamente. El problema es que los especialistas en cognición necesitan poder controlar muchas variables para entender el significado real de los resultados del experimento. Andar a la espera de que el habla interior surja de forma natural parece ir en contra de la idea del método experimental riguroso.

La nueva ciencia del habla interior nos dice que es cualquier cosa menos un proceso aislado. Gran parte del poder de la conversación interna proviene de la manera en que se orquesta un diálogo entre diferentes pareceres

Lo que necesitamos son métodos de captura del habla interior cuando esta ocurre. Recientemente nuestro equipo ha dado un paso en esa dirección mediante un sofisticado método que obtiene descripciones de la experiencia interior de las personas denominado muestreo de experiencia descriptiva (DES, por sus siglas en inglés). En este método, los voluntarios son adiestrados para informar sobre los momentos de experiencia interior cuando se les indica mediante un busca. El proceso facilita que se concentren en lo que quiera que estén pensando, sintiendo, oyendo o lo que sea, en el preciso momento antes de que el busca deje de sonar, y luego anoten brevemente esas experiencias cuando ocurren. Al día siguiente se les somete a una entrevista en profundidad acerca de cada momento de la experiencia capturada por el busca, de forma que los investigadores puedan describir si se trata de habla interior, percepción sensorial o alguno de otros muchos fenómenos frecuentes.

Mis colegas y yo llevamos a cabo el primer estudio que acoplaba este poderoso método con la RMf. Pedimos a las personas que se dijeran determinadas palabras a sí mismas en silencio mientras permanecían tumbadas en el imán de resonancia. Además, empleamos el DES para capturar los momentos de experiencia cuando ocurrían de forma natural. Seleccionamos aquellos avisos en los que estábamos bastante seguros de que había surgido habla interior, a tenor de las entrevistas que siguieron al DES, y comparamos la actividad cerebral con la observada en la tarea estándar.

Las diferencias fueron impresionantes. Mientras que el método estándar de «repetición» activaba el área de Broca (una parte del cerebro implicada en la producción del habla interna y externa), el habla interior espontánea desataba una actividad más pronunciada bastante más atrás, en el lóbulo temporal, en concreto en el giro de Heschl. En cuanto a los patrones de activación cerebral, el habla interior que surge de manera espontánea contrasta drásticamente con la que se produce bajo petición.

Estos descubrimientos tienen amplias implicaciones sobre el modo en que abordamos la investigación de las experiencias interiores en el ámbito de la neurociencia cognitiva. Plantean cuestiones difíciles acerca de cómo se enfoca el estudio del habla interior y qué podemos suponer los investigadores sobre cualquier tipo de experiencia mental que creamos posible generar a demanda. Destaca la necesidad de lo que me gusta llamar neurociencia lenta: sacar partido de la potencia de las técnicas neurocientíficas para hacer una descripción meticulosa de la experiencia humana.

Hay otras razones para proceder con cautela a la hora de describir el habla interior en todas sus variantes. En la teoría de Vygotski, el diálogo y el monólogo no son las únicas variables de la conversación interna. Una gran virtud de su hipótesis es la idea de que, cuando el lenguaje se interioriza en forma de habla privada y luego en habla interna, su forma cambia. Vygotski barajó varios mecanismos de transformación, entre ellos diferentes tipos de abreviatura o condensación. Durante mi discurrir ansioso en la habitación del hotel de Londres me pillé dirigiéndome una frase entera: «Ya has estado antes en *Start the week*». Otras veces el lenguaje con el que me dirijo a mí mismo es mucho más simple. Si escucho un pitido agudo en la cocina cuando estoy guisando, me digo a mí mismo algo así como «El temporizador del horno ha sonado». Sin embargo, es más probable que simplemente diga: «El temporizador». Vygotski observó que el habla interior y privada están frecuentemente abreviadas y son relativas a enunciados dirigidos a otra persona. En la conversación con nosotros mismos habitualmente no tenemos que poner cosas en frases completas, en parte porque

la expresión va dirigida a uno mismo y no hemos de precisar todos los detalles. El gran novelista ruso-americano Vladimir Nabokov reconocía cómo nuestros pensamientos pueden tener una forma comprimida respecto a lo que verbalizamos en voz alta. «No pensamos con palabras sino con sombras de palabras», escribía en sus anotaciones para *Pálido fuego*, según una entrevista de 1964.

Por extraño que parezca, nadie había examinado esa característica del lenguaje interno hasta hace poco. Simon McCarthy-Jones, actualmente en el Trinity College de Dublín, y yo mismo confeccionamos un cuestionario en línea donde se preguntaba a la gente acerca de las diferentes cualidades del habla interna. Nuestro equipo también empleó una aplicación para telefonía móvil que permitía recabar ese tipo de datos a lo largo del quehacer cotidiano de las personas. Los resultados de ese estudio inicial, publicados en 2011, revelan cuatro grandes cualidades del habla interna: el carácter dialogal, la tendencia a ser condensada, el grado hasta el que puede incorporar voces de otras personas y su rol en la evaluación o la motivación de nuestra conducta. Solo una minoría indicó que su habla interna tendía a ser condensada, pero esta cualidad es lo suficientemente común como para justificar ulteriores investigaciones.

Antes que nada, esta encuesta de investigación confirma la idea de que el habla interna no es una única cosa. Parece adoptar distintas formas adaptables a diferentes funciones que posiblemente tengan distintas bases neurales. Un reto para el futuro es averiguar si el cerebro gestiona el habla interna condensada y expandida de manera dispar. Eso requerirá, o bien una forma de provocar experimentalmente el habla interna condensada en el escáner cerebral, o bien avances en su registro cuando ocurra naturalmente. El habla interior continúa siendo un objeto de estudio esquivo.

UNA LLAVE PARA LA CREATIVIDAD

La investigación del habla interna ha experimentado grandes progresos desde que comenzara a meditar sobre el tema cuando cursaba mi posgrado, allá por los años noventa. Una faceta de la vida mental que por lo general era considerada como impenetrable para la ciencia ha proporcionado nuevos métodos experimentales y técnicas de neurociencia. Sin ir más lejos, el aspecto íntimo de la consciencia puede iluminar algunas cuestiones importantes acerca de la mente humana.

Para empezar, el habla interna puede aportar algunas claves sobre el origen de la creatividad. Cuando mantenemos conversaciones interiores sobre arquitectura, podemos usarlas de muchas maneras, desde debatir con uno mismo hasta conversar con un ente imaginario. Puesto que hemos interiorizado diálogos con otros, mantenemos una «ventana abierta» a las perspectivas de otros: estén o no presentes, estén vivos o no, o siquiera hayan existido. Mis diálogos con Dios, con un progenitor fallecido o con un amigo imaginario pueden ser tan ricamente creativos como los que entablo conmigo mismo. Formularse preguntas y darles respuesta uno mismo puede ser una parte crucial de la maquinaria que impulsa nuestros pensamientos hacia nuevos territorios.

Otra experiencia corriente que nos lleva a la autoconversación es una de las más familiares y privadas de todas. En el momento en que abres un libro, tu habla interior es secuestrada de multitud de diversas e interesantes maneras. Se ha demostrado que leer el discurso de los personajes ficticios estimula las mismas zonas del cerebro que usamos para procesar la voz de otras personas. A través de una encuesta en línea, nuestro equipo preguntó recientemente a un gran número de ávidos lectores por las «voces» que oían cuando leían novelas de ficción. Casi uno de cada siete afirmó que las voces de los personajes resonaban en su mente tan vívidamente como si hubiera otra persona en la estancia recitando las palabras.

Algunos participantes nos dieron más detalles sobre su experiencia acerca de las voces ficticias. Con las herramientas empleadas en la literatura para analizar la narrativa, examinamos sus descripciones abiertas para recabar más indicios sobre el poder de la literatura para colonizar nuestros pensamientos. Al menos para algunos de nuestros probandos, las voces de los personajes novelescos seguían resonando aún después de haber cerrado el libro. Algunos adoptaron la imagen de los personajes de ficción en su vida cotidiana, por ejemplo mirando a través de los ojos de Mrs. Dalloway (protagonista de la novela homónima de Virginia Woolf) durante la visita habitual a la cafetería. Marco Bernini, de la Universidad de Durham, llama a este fenómeno «cruce de experiencias». Estos hallazgos nos brindan claves importantes sobre cómo se representan en nuestra mente las voces y las personalidades de las «existencias sociales con quienes compartimos el mundo».

La nueva ciencia del habla interior nos dice que es cualquier cosa menos un proceso aislado. Gran parte del poder de la conversación interna proviene de la manera en que se orquesta un diálogo entre distintos pareceres. A semejanza de la colaboración que mis colegas y yo vimos entre el sistema del lenguaje del hemisferio izquierdo y la red de cognición social del derecho, la red del habla interior debe poder «conectarse» a otros sistemas neuronales cuando la situación lo exige: cuando pensamos sobre el pasado y el futuro, cuando nos dirigimos a nosotros mismos en mitad de una tarea agotadora o difícil, o simplemente cuando nuestra mente divaga sin ningún objeto en particular. Si los investigadores aciertan con la ciencia, el pensamiento verbal invitará a dilucidar todas esas características de nuestra cognición. Tal vez su cotidianidad explique por qué el habla interior ha recibido tan magra atención hasta ahora. Pero la próxima vez que se encuentre a si mismo mentalizándose ante un reto, dándole vueltas a un dilema, regañándose por un error o simplemente planificando su tarde en medio de un murmullo entre dientes, tal vez quiera pensar en el prodigio íntimo que supone el uso del verbo dirigido a uno mismo. Cada día, como en el laboratorio, las voces del habla interior tienen mucho que decirnos. IyC

PARA SABER MÁS

The varieties of inner speech: Links between quality of inner speech and psychopathological variables in a sample of young adults. Simon McCarthy-Jones y Charles Fernyhough en *Consciousness and Cognition*, vol. 20, n.º 4, págs. 1586-1593, diciembre de 2011.

Inner experience in the scanner: Can high fidelity apprehensions of inner experience be integrated with fMRI? Simone Kühn et al. en *Frontiers in Psychology*, vol. 5, art. 1393, 9 de diciembre de 2014.

The brain's conversation with itself: Neural substrates of dialogic inner speech. Ben Alderson-Day et al. en *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, vol. 11, n.º 1, págs. 110-120, enero de 2016.

Uncharted features and dynamics of reading: Voices, characters, and crossing of experiences. Ben Alderson-Day et al. en *Consciousness and Cognition*, vol. 49, págs. 98-109, marzo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Por qué hablan solos los niños? Laura E. Berk en *IyC*, noviembre de 1994.



DESAPARICIÓN ANUNCIADA:
El singular tuátara de Nueva Zelanda se enfrenta a la extinción a causa del cambio climático.



CONSERVACIÓN

DESPLAZAR A LAS ESPECIES EN PELIGRO

A fin de salvar las especies amenazadas por el cambio climático, hay quien plantea su traslado a zonas nuevas, una propuesta no exenta de riesgo

Richard Conniff



Richard Conniff es un laureado escritor científico y publica artículos de opinión en el *New York Times*. Entre sus libros se cuentan *House of lost worlds* (Yale University Press, 2016) y *The species seekers* (W. W. Norton, 2010).



n la isla North Brother, un peñasco bañado por las aguas del estrecho de Cook, en Nueva Zelanda, una colonia de lagartos vestigio del pasado más remoto se está masculinizando con rapidez. En los años noventa, cuando el desequilibrio se estudió por vez primera, la proporción de sexos era del 62,4 por ciento, y desde entonces no ha cesado de empeorar hasta superar ya el 70 por ciento. Se acusa de ello al cambio climático: la temperatura del suelo determina el sexo de los embriones del tuátara. Las temperaturas frías favorecen la feminización y las cálidas la masculinización. Cuando el calentamiento empuje la cifra de los machos hasta el 85 por ciento, los tuátaras de North Brother caerán irremediablemente en lo que los biólogos llaman una espiral de extinción.

Para el tuátara y muchas otras especies amenazadas por el calentamiento del planeta, la reubicación en lugares nunca habitados por ellos, lo que se conoce como colonización, o migración, asistida, está comenzando a convertirse en su única esperanza de salvación. «Preferiríamos hacer algo un poco más natural», declara Jessica Hellman, ecóloga de la Universidad de Minnesota y una de las primeras especialistas en poner sobre la mesa la idea de la colonización asistida. Sería mejor que la especie cambiara su área de distribución por sí sola, a través de corredores naturales por los que andaría en busca de un nuevo hogar antes de que el antiguo dejara de ser habitable. Pero, para muchas especies insulares y montanas, el desplazamiento a gran distancia simplemente no es posible, aclara Hellman. En otros casos, los viejos corredores ya no existen porque el desarrollo humano los ha fragmentado.

La idea de la colonización asistida como método de conservación ha suscitado encendidas críticas, empero, a causa del riesgo de desastre ecológico, tanto para la especie reubicada como para el hábitat de acogida. Además, muchos conservacionistas han dedicado su vida a recuperar especies en lugares donde solían vivir 100 o 200 años atrás, como el lobo gris en Yellowstone o el bisonte en las Grandes Llanuras de EE.UU. Imaginar nuevos lugares donde podrían vivir en un futuro indefinido suena a herejía.

Pero, a medida que la devastación sembrada por el cambio climático se ha ido haciendo más y más evidente, las críticas han dado paso a las directrices sobre cómo y cuándo proceder al traslado de especies, y a una creciente aceptación, a regañadientes, de la colonización asistida. Una encuesta entre 2300 expertos en biodiversidad, publicada en 2015 en la revista en línea *Elementa: Science of the Anthropocene*, constató que la mayoría estaban a favor de la idea, con una clara condición: siempre que evitara la extinción de la especie de interés y supusiera un riesgo mínimo o nulo para el hábitat de acogida.

FUERA DE LOS LÍMITES

La necesidad de concebir planes para lo que serían evacuaciones de emergencia se hizo dolorosamente patente en noviembre de 2015, cuando un incendio forestal asoló el hábitat de uno de los mamíferos más amenazados del planeta, un pequeño marsupial llamado rata canguro de Gilbert, en una región afectada por la sequía en Australia Occidental. El incendio mató a quince de la veintena de individuos que se calcula que habitaban en la reserva, donde esta especie fue redescubierta en 1994 tras ser dada por extinta durante más de un siglo. La destrucción de ese hábitat hubiera supuesto su condena a la extinción de no ser porque, años después de su redescubrimiento, se decidió fundar otra colonia en las cercanías.

La rata canguro quedó reasentada dentro de su área de distribución originaria, lo cual genera mucha menos controversia que el traslado a una zona totalmente nueva. En otros lugares, los conservacionistas también han comenzado a ganar tiempo actuando de ese mismo modo. En los cayos de Florida ya han llevado poblaciones del ciervo y del cactus arbóreo autóctonos hacia zonas más elevadas, en un intento de concederles unas décadas más de hábitat adecuado ante el mar en ascenso. Para *Melomys rubicola*, un diminuto roedor endémico del cayo Bramble, en el noreste de Australia, ya es demasiado tarde para esa táctica dilatoria. En junio de 2016, investigadores de la Universidad de Queensland anunciaron que la especie había desaparecido tras

EN SÍNTESIS

El cambio climático está alterando el hábitat de numerosas especies hasta el punto de poner en peligro su existencia.

Para salvarlas, cada vez más conservacionistas abogan por su traslado a lugares donde nunca han existido.

Esa colonización asistida entraña riesgos tanto para la especie reubicada como para el hábitat de acogida, pero podría ser la mejor opción para evitar su desaparición.

PÁGINAS ANTERIORES: FRANS LANTING, GETTY IMAGES







ZARIGÜEYA PIGMEA DE MONTAÑA (*Burramys parvus*)
PROBLEMA: El hábitat alpino de este marsupial australiano seriamente amenazado se está calentando tan rápido que no puede desplazar su hogar ladera arriba para escapar.

SOLUCIÓN: Los conservacionistas debaten en este momento adónde trasladar esta zarigüeya nocturna. La decisión es compleja porque también habría que llevar consigo a su presa favorita, la polilla de Bogong (*Agrotis infusa*).

HIHI (*Notiomystis cincta*)
PROBLEMA: El hihi habita en la neozelandesa isla del Norte. En los años venideros, el cambio climático hará que su hábitat deje de ser adecuado.

SOLUCIÓN: Ese mismo cambio creará condiciones favorables para él en la isla del Sur, la otra gran isla del país, situada fuera de su área de distribución. Los conservacionistas barajan crear una nueva población allí.

CIERVO DE LOS CAYOS (*Odocoileus virginianus clavium*)
PROBLEMA: El ascenso del mar acabará sumergiendo grandes áreas de los cayos de Florida, donde sobreviven menos de un millar de estos diminutos ciervos.

SOLUCIÓN: Los expertos han trasladado algunos grupos de este herbívoro, una subespecie del ciervo de Virginia, a zonas más elevadas del archipiélago para ganar unas décadas de tiempo.

JASON EDWARDS, GETTY IMAGES (*zarigüeya*); ROBIN BUSH, GETTY IMAGES (*pájaro*); GETTY IMAGES (*ciervo*)

las reiteradas inundaciones sufridas por la isla, que era su único hogar. Describieron el suceso como lo que probablemente era «la primera extinción probada de un mamífero motivada por el cambio climático antropogénico».

De ahí que la mayor esperanza para otras especies podría radicar más allá de su área de distribución original. Por ejemplo, las marismas donde habita la hoy rarísima tortuga serpentina occidental, en las afueras de Perth, afrontan la triple amenaza del calentamiento global, el crecimiento urbano y la explotación incesante del acuífero subterráneo por parte de la ciudad. Tracy Rout, de la Universidad de Queensland, y sus colaboradores recurrieron a una supercomputadora para elegir entre 13.000 posibles puntos de reubicación dispersos por toda la región. El trabajo sobre el terreno acabó por reducir la lista a un puñado de lugares situados unas horas al sur de la ciudad, cuya hidrología, amén de otras condiciones, probablemente seguirá siendo la adecuada en el clima más árido que se pronostica para los próximos 30 o 50 años. Una vez obtenidos los permisos preceptivos de las autoridades de fauna y medioambiente, en agosto de 2016 trasladaron en automóvil el primer grupo de tortugas criadas en cautividad para iniciar su introducción en el nuevo hogar.

Otros investigadores de Australia están debatiendo adónde trasladar la amenazada zarigüeya pigmea de montaña. Buena prueba de la complejidad de tales traslados es el hecho de que tal vez sea necesario llevar consigo también a su alimento predilecto, la polilla de Bogong. El hábitat alpino de ambas se está calentando a tal ritmo que simplemente ascender ladera arriba ya no será posible.

El uso de la colonización asistida como instrumento para afrontar el cambio climático no es una novedad. Stephen G. Willis, ecólogo de la Universidad de Durham, y Jane K. Hill, ahora en la Universidad de York, han estado llevando a cabo experimentos en este sentido desde 1999. Al estudiar el impacto del cambio climático sobre especies de mariposas británicas, como la relativamente abundante medioluto norteña (*Melanargia galathea*) y la dorada línea larga (*Thymelicus sylvestris*), observaron que había una zona de clima adecuado para ellas al norte de su límite, donde no habían llegado.

Su ausencia en esa zona deriva del fenómeno nombrado vacío migratorio. Aunque los corredores naturales permanezcan intactos, las especies no reaccionan al mismo ritmo con el que avanza el cambio climático. A primera vista, ese tipo de retraso sería comprensible en los árboles. Pero los estudios han confirmado que incluso las aves y numerosos mamíferos marchan a la zaga de las variaciones del clima, tal vez porque dependen de la vegetación y de los hábitats, que se desplazan con más lentitud. La brecha que separa la velocidad del clima de la de los seres vivos puede ser insalvable. Joshua J. Lawler, de la Universidad de Washington, prevé que si su hogar en la selva de Sudamérica se torna más árido y cálido, el sapito minero tendrá que acometer un salto de varios cientos de kilómetros hacia el suroeste para hallar un hábitat adecuado a finales de siglo.

Cuando Willis y Hill se percataron de que sus dos mariposas marchaban rezagadas, tomaron la decisión de ayudarlas a salvar esa distancia. «Lo hicimos a modo de demostración, como un buen caso práctico», explica Hill. Consiguieron los permisos necesarios porque los hábitats para las reubicaciones propuestas eran relativamente restringidos, en canteras y áreas urbanizadas, y porque se sabía que otras especies del lugar eran compatibles. Liberaron las medioluto norteñas y las doradas línea larga en zonas situadas, respectivamente, a 65 y 35 kilómetros



TORTUGA SERPENTINA OCCIDENTAL
(*Pseudemydura umbrina*)

PROBLEMA: El cambio climático y la destrucción del hábitat suponen serias amenazas para este reptil australiano gravemente amenazado, que medra en los humedales cercanos a Perth.

SOLUCIÓN: Por medio de un superordenador se han acotado los puntos de reubicación que probablemente seguirán siendo adecuados para esta tortuga en las décadas venideras.



SAPITO MINERO
(*Dendrobates leucomelas*)

PROBLEMA: Se prevé que a medida que el hogar selvático de este anfibio sudamericano se haga más cálido y seco, tendrá que desplazarse cientos de kilómetros hacia el suroeste.

SOLUCIÓN: De momento no existe ningún plan de colonización asistida para esta especie.



MEDIOLUTO NORTEÑA
(*Melanargia galathea*)

PROBLEMA: El cambio climático está desplazando su hábitat hacia el norte sin que esta mariposa haya seguido el ritmo de ese avance.

SOLUCIÓN: Los ecólogos capturaron un grupo de mediolutos en North Yorkshire, en Inglaterra, y las soltaron 65 kilómetros al norte de su área de distribución natural. Las recién llegadas parecen prosperar en su nuevo hogar.

al norte de su límite tradicional. Ambas parecen prosperar en su nuevo hogar, asegura Willis. Pero todas las directrices en desarrollo para la migración asistida coinciden en un aspecto: «Es preciso proceder con suma cautela. Nadie querría soltar otro conejo en Australia», añade.

RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

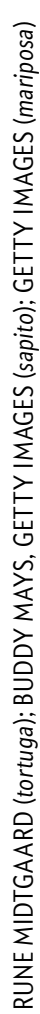
El traslado de cualquier especie entraña un riesgo. En una crítica publicada en 2009, Anthony Ricciardi, de la Universidad McGill, y Daniel Simberloff, de la Universidad de Tennessee en Knoxville, instaban a los conservacionistas a «no jugar a la ruleta con la ecología», y más adelante advertían de que los partidarios habían subestimado enormemente lo difícil que resulta predecir el impacto de las especies introducidas en un hábitat nuevo, aun con los análisis más meticulosos y prudentes.

Ambos recordaron la decisión tomada en Terranova en los años sesenta de introducir la ardilla roja en los bosques de piceas negras, con la idea de que sirvieran de alimento para las martas americanas. A este mustélido, entonces en declive, la ardilla no le pareció un bocado apetitoso. Y las piñas de las piceas, que durante 9000 años habían brotado sin su presencia, quedaron indefensas ante la recién llegada. A raíz de ello, el piquituerto de Terranova, una subespecie del piquituerto común que subsiste con sus piñones, cayó en declive por la nueva competidora. Ahora está en peligro y se ha convertido en un ejemplo de cómo las mejores intenciones pueden devenir en desastre cuando se importan especies.

Pese a todo, es posible reducir el riesgo de que tales desastres sucedan. Nathalie Pettorelli, de la Sociedad Zoológica de Londres, y sus colaboradores se disponen a hacer exactamente eso en un estudio iniciado en 2013 con el hihi de Nueva Zelanda, un bello pájaro amarillo y negro, de vuelo estático, al que le separan 34 millones de años de evolución de su pariente vivo más cercano. Sobrevive solo en cinco puntos aislados de la isla del Norte y otras islas aledañas, donde los conservacionistas prestan apoyo con los mismos comederos de agua azucarada que se instalan en Norteamérica para los colibríes. Pettorelli y otros autores calculan que en las décadas venideras el cambio climático hará que el hábitat septentrional sea adverso para él. Por el contrario, se abrirá otro espacio adecuado en la isla del Sur, donde nunca ha existido.

«No pretendíamos decir cuándo, cómo o adónde trasladar al hihi», recuerda Pettorelli. Esa es tarea de los gestores locales. Pero los investigadores pensaron que podrían elaborar una metodología para tomar meditadamente ese tipo de decisiones. Comenzaron desgranando la media docena de razones por las que puede salir mal una translocación del hábitat, a saber: efectos negativos sobre otras especies (riesgo ecológico), introducción de nuevos patógenos (riesgo de enfermedad), posibilidad de traspasar los límites previstos y de entrar en competencia con otras especies autóctonas (riesgo de invasión), hibridación con una especie afín (riesgo de escape de genes) y, por último, los costes para los residentes humanos (riesgo socioeconómico). Acto seguido, valoraron múltiples factores climáticos, como el grado de aridez alcanzado durante la estación seca y la variación de la pluviometría en el curso del año, tanto en los antiguos hábitats como en los nuevos potenciales, a fin de dotar a sus modelos de la mayor precisión posible.

«Hemos de estrechar la colaboración entre los que toman las decisiones sobre el terreno y los científicos. Muchas personas quieren cooperar juntas, pero no saben cómo porque carecen de las conexiones necesarias.» Incluso ahora mismo se están



tomando numerosas decisiones de gestión sin tener en cuenta los datos científicos disponibles y sin saber sacar provecho de ellos, advierte Pettorelli. El propósito del ejercicio era mostrarles el modo de hacerlo. Como consecuencia, los conservacionistas están pensando en fundar una nueva población de hihi en la isla del Sur.

RESULTADOS INCIERTOS

Y, sin embargo, a los partidarios de la colonización asistida su preocupación les podría hacer caer en la precipitación. A veces la no intervención (dejar que el animal se adapte solo) sale bien. En las Montañas Rocosas que se alzan al oeste de Denver, Colorado, las flores alpinas escasean ahora por el alza de las temperaturas. Así que los abejorros provistos de probóscides (lenguas) largas para libar en las flores con tubos polínicos profundos se han vuelto menos exigentes. Eso está revirtiendo el proceso evolutivo y ha hecho que durante los últimos 40 años pierdan una cuarta parte de la probóscide para poder nutrirse de la flora que sigue creciendo allí.

Los seres vivos también pueden mostrar resiliencia de modos inesperados. En 2010, en el sur de Australia, unos investigadores que trabajaban en una pesquería comercial de langosta australiana (*Jasus edwardsii*) trasladaron 10.000 ejemplares desde las aguas profundas. Pero, en lugar de depositarlas en una latitud más cercana al polo para crear poblaciones de avanzada en aguas más frías, las trasladaron hacia el ecuador y hacia la orilla, para comprobar cómo se las apañarían en las condiciones más cálidas predichas en un futuro próximo. Contra toda lógica, las langostas comenzaron a crecer cuatro veces más rápido que en su lugar de origen y a criar prolíficamente, con una puesta anual de 35.000 huevos. Resultaron ser más adaptables de lo esperado a los cambios de temperatura, y contaban con más alimento.

Predecir ese tipo de resiliencia es harto difícil. Cuando recientemente se ha estudiado qué suerte han corrido 155 tipos de mariposas y polillas británicas durante los últimos 40 años de cambio climático, se ha visto que, en términos generales, a la mitad parece irle mejor y a la otra mitad peor. Diferentes factores pesan en las distintas especies: unas son sensibles a las temperaturas estivales, otras a las invernales, unas a las lluvias primaverales, y así sucesivamente, casi hasta el infinito. «Resulta que esas 155 especies de lepidópteros tienen casi otras tantas "opiniones" distintas acerca de cuánto ha cambiado el clima y de si ha mejorado o empeorado», observa Chris D. Thomas, de la Universidad de York.

Así que, ¿cómo afecta toda esa incertidumbre que envuelve a una especie como el tuátara? Los machos pueden procrear cada año, mientras que las hembras de North Brother solo hacen una puesta cada nueve años. Eso significa que sufren el acoso constante de los machos y ello mina rápidamente su salud, un problema que no hace sino empeorar a medida que la proporción de sexos se decanta hacia el lado masculino. Puesto que la isla North Brother no ofrece sombra alguna y contados abrigos o grietas para mitigar el efecto masculinizante de las temperaturas cálidas, el medio millar de tuátaras que habita en ella se ha convertido en un barómetro de cómo un planeta que se calienta con rapidez afectará a la especie entera. Empujados fuera del continente y arrinconados en un puñado de islotes, los 100.000 tuátaras vivientes encarnan el último vestigio de un linaje evolutivo de 200 millones de años.

Nicola Mitchell, de la Universidad de Australia Occidental, ha escrito un artículo con otros autores donde enumera las opciones factibles para la gestión de North Brother. Todas las partes implicadas en la conservación del tuátara (zoólogos y ecólogos, autoridades y el pueblo maorí, para el que representa un símbolo cultural) deberían ponerse de acuerdo para eliminar las estructuras innecesarias y proveer sitios de anidamiento en las vertientes más frías de las islas. O podrían recolectar los huevos para incubarlos en cautividad bajo temperaturas controladas y así igualar la proporción de sexos. O bien podrían restaurar el equilibrio de sexos protegiendo a las hembras recién nacidas e incorporándolas a la población al tiempo que retiran los machos sobrantes.

«Pero todas esas opciones son difíciles de llevar a la práctica», asegura Mitchell, que pasó dos veranos en el islote buscando nidos. «Cada año son muy pocas las hembras que ponen; además, son muy sigilosas y nada fáciles de localizar.» Trasladar el tuátara a un lugar más frío representaría la solución más sencilla, pero resulta costosa, puesto que cada viaje a la isla North Brother implica tomar un helicóptero desde Wellington. Además, en otros islotes cercanos ya existen otras poblaciones de la misma subespecie (si bien de un grupo genético distinto). Tal vez la mejor solución sea considerar al tuátara de la isla North Brother como una población prescindible. Es decir, que los científicos se limiten a aguardar mientras observan la marcha de los acontecimientos y, si el grupo acaba desapareciendo, que así sea.

En definitiva, tales decisiones se reducen a un sola cuestión: hasta dónde están dispuestos a llegar los biólogos y el conjunto de la sociedad en su intervención sobre el curso natural para decidir las especies que sobrevivirán y las que no. «¿Cuándo nos sentiremos como si estuviéramos favoreciendo los procesos naturales, y cuándo como si practicáramos la jardinería? En el jardín no habrá cabida para toda la biodiversidad», reflexiona Jessica Hellman. IyC

PARA SABER MÁS

Saving a million species: Extinction risk from climate change. Dirigido por Lee Hannah. Island Press, 2011.

Biodiversity in a changing climate: Linking science and management in conservation. Dirigido por Terry Louise Root et al. University of California Press, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Qué especies sobrevivirán? Michelle Nijhuis en *IyC*, octubre de 2012.

Ayudar a los bosques a adaptarse al cambio climático. Hillary Rosner en *IyC*, diciembre de 2015.

por Samuel Zamora

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Equinodermos con visión

Dotadas de un sistema de múltiples lentes, las estrellas de mar y las ofiuras detectan cambios de luz en el entorno

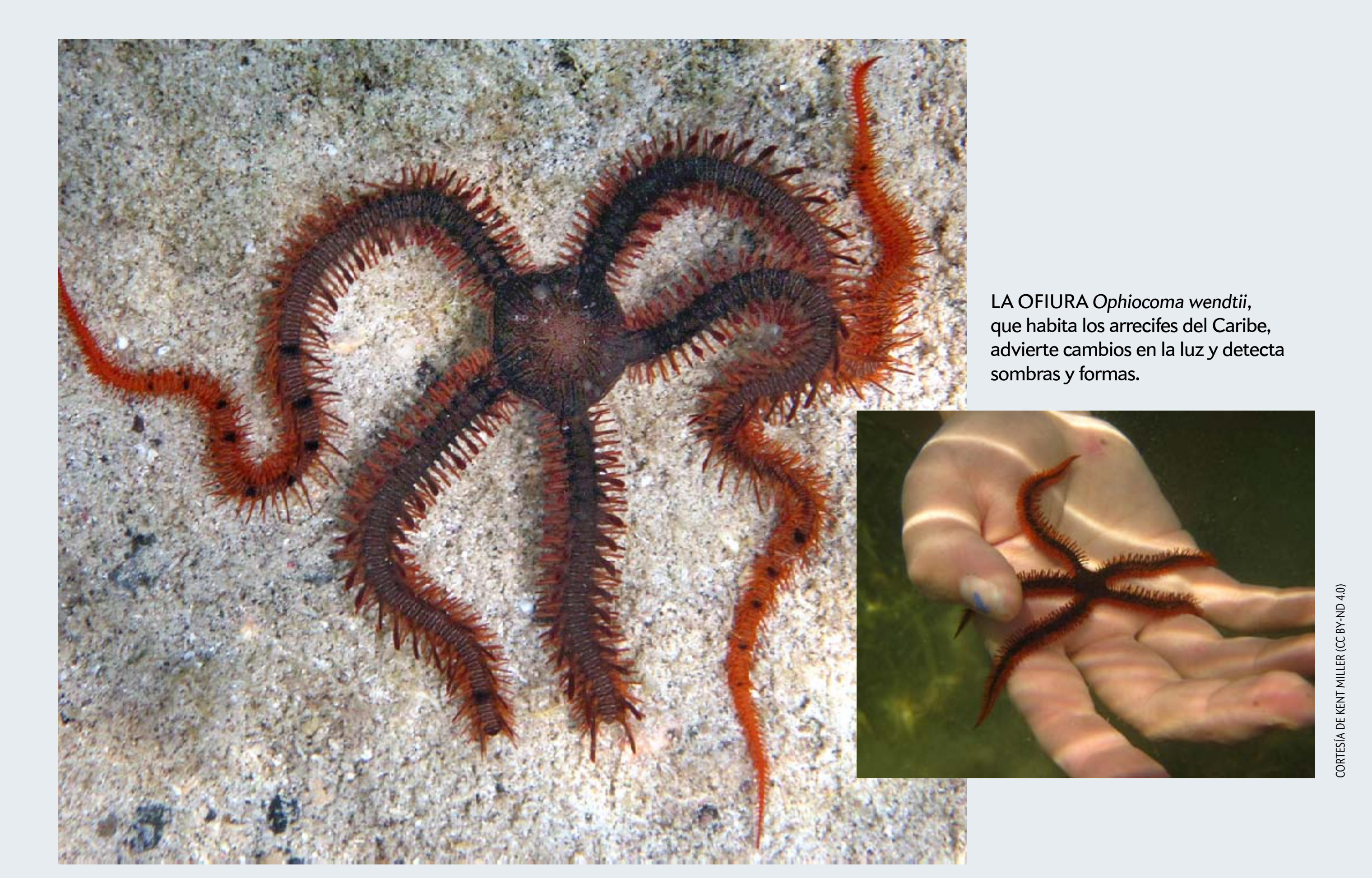
Las ofiuras, como *Ophiocoma wendtii*, son equinodermos, grupo al que pertenecen también las estrellas de mar y los erizos. Esta especie vive en arrecifes del Caribe y cambia de color para pasar inadvertida a los depredadores: de rojizo oscuro, durante el día, a marrón grisáceo durante la noche. Pero, si los equinodermos carecen de ojos, ¿cómo percibe la ofiura la presencia de un depredador?

Los equinodermos suelen poseer un endoesqueleto de calcita poroso denominado estereoma. Pero el de *O. wendtii* cuenta, además, con una peculiaridad: su superficie se halla salpicada de miles de pequeñas lentes de apenas 20 micras cada una. Todas juntas funcionan como un ojo compuesto que permite detectar sombras y formas de posibles depredadores.

Recientemente, nuestro grupo ha identificado estas lentes en fósiles de ofiuras y estrellas de mar de 136 millones de años de antigüedad, correspondientes al período Cretácico, resultados que publicamos el pasado septiembre en *Evolutionary Biology*. Para visualizar y estudiar estas estructuras hemos empleado tres técnicas: la microscopía electrónica de barrido para obtener una imagen de la superficie del estereoma; la tomografía mediante radiación de sincrotrón para observar su estructura interna; y la difracción de electrones por retrodispersión para analizar la orientación de los cristales de calcita de las lentes. Ello nos ha permitido reconstruir las lentes de organismos fósiles y actuales y determinar cómo se desarrollan en relación con el resto del esqueleto. Su forma biconvexa minimiza la aberración esférica durante el enfoque, mientras que su orientación cristalográfica elimina la birrefringencia (división de la luz en dos componentes).

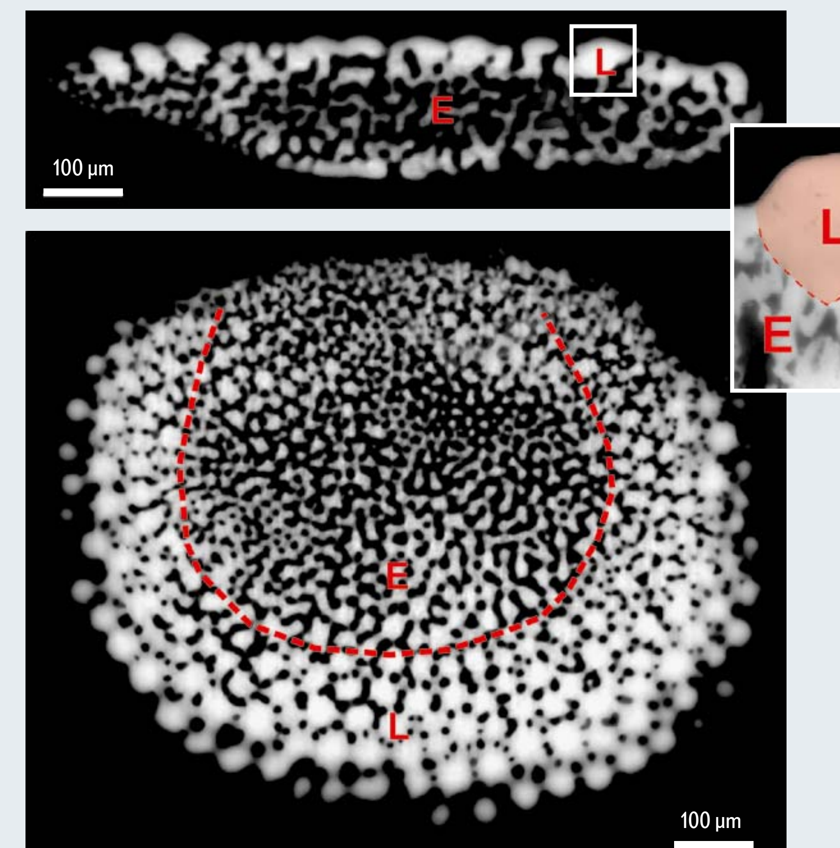
¿Cómo adquirieron estos animales las lentes? A principios del Cretácico se produjo un evento importante en la diversificación de algunos peces, que se convirtieron en depredadores potenciales de las estrellas de mar y las ofiuras. Tal cambio propiciaría la aparición de las lentes en los equinodermos, que así podrían ver a sus atacantes y huir. Ello demuestra su enorme capacidad de adaptación evolutiva. Optimizaron un material, el esqueleto de calcita, cuya función original es sostener las partes blandas, para dotarlo también de un sistema visual avanzado.

—Samuel Zamora
Instituto Geológico y Minero de España



LA OFIURA *Ophiocoma wendtii*, que habita los arrecifes del Caribe, advierte cambios en la luz y detecta sombras y formas.

EL ESQUELETO de la ofiura actual *O. wendtii* (*arriba*) y de un ofiuroideo fósil (*abajo*), visto al microscopio electrónico de barrido a distintos aumentos, revela una superficie cubierta de un sinfín de protuberancias, las cuales corresponden a microlentes.



LA ESTRUCTURA INTERNA del esqueleto de la ofiura puede visualizarse mediante la tomografía de radiación de sincrotrón. En una vista transversal (*arriba*) y superior, o axial (*abajo*), del esqueleto destacan las lentes (*L*) respecto al tejido más denso, denominado estereoma (*E*). Un examen detallado muestra la morfología biconvexa de las lentes (*inserto*).

CORTESÍA DE LOS AUTORES (*micrografías*)

por Xavier Roqué

Xavier Roqué es investigador del Centro de Historia de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Barcelona.



Pasado en construcción

Crónica del último congreso anual de la Sociedad Británica de Historia de la Ciencia, que este año cumple siete décadas

En 1947, el historiador británico Herbert Butterfield impartió en la Universidad de Cambridge un curso sobre historia de la ciencia publicado dos años más tarde con el título de *Los orígenes de la ciencia moderna* (*The origins of modern science, 1300-1800*, Bell, 1949). Butterfield caracterizó la revolución científica de los siglos XVI y XVII como un acontecimiento histórico crucial que reducía «el Renacimiento y la Reforma a simples episodios y meros cambios internos en el seno de la cristiandad medieval». La importancia de la ciencia era evidente en los primeros compases de la Guerra Fría. Su imagen pública se construía en las formas más diversas y los lugares más insospechados, incluida la literatura infantil. Ese mismo año apareció el sexto volumen de la serie de aventuras de Los cinco, *Los cinco otra vez en la isla de Kirrin* (*Five on Kirrin's island again*, 1947). Es muy probable que su autora, Enid Blyton, se inspirara en las recientes pruebas nucleares del atolón Bikini al crear una isla en la que un científico extraordinario realizaba experimentos secretos.

La Sociedad Británica de Historia de la Ciencia (BSHS, por sus siglas en inglés) nació en ese contexto. Su presidenta actual, Patricia Fara, de la Universidad de Cambridge, lo evocó en la apertura del congreso anual que se celebró en la Universidad de York (Reino Unido) entre el 6 y el 9 del pasado julio. Sin ser la más antigua de las sociedades científicas dedicadas a la historia de la ciencia, la BSHS es, sin duda, una de las que cuenta con una trayectoria más sólida. En el encuentro se conmemoró su septuagésimo aniversario.

CONFERENCIA INAUGURAL del congreso, a cargo de Patricia Fara, la actual presidenta de la Sociedad Británica de Historia de la Ciencia.

SOCIEDAD BRITÁNICA DE HISTORIA DE LA CIENCIA; ALICE WHITE, EDITORA DE *VIEWPOINT*, EL MAGACÍN DE LA BSHS

La pervivencia del pasado

Esta reseña toma su título de la conferencia que inauguró el congreso: «The past is a work in progress». Fara aludió al conocido ensayo de David Lowenthal, *The past is a foreign country* («El pasado es un país extraño», Akal, 1998). Frente a la extrañeza que nos causa el contacto con otras culturas, Fara citó a William Morris para señalar la pervivencia del pasado: «El pasado no está muerto, sino que vive en nosotros, y estará vivo en el futuro que estamos ayudando a construir» (prefacio a *Medieval lore*, 1893). Lo ejemplificó con la cuestión de género y ciencia, a la que ha dedicado numerosos trabajos. Iniciativas actuales, como la Red Académica de Mujeres de Ciencia (SWAN), entre tantas otras, aspiran a culminar esfuerzos previos por recuperar, visibilizar y posibilitar el trabajo científico de las mujeres.

La historia de la ciencia se ha consolidado como disciplina académica sin dejar de ensanchar su horizonte metodológico y crear nuevos objetos de estudio. El programa del congreso reflejó tal diversidad. Desde el punto de vista temático, las sesiones dedicadas a científicos como Darwin, disciplinas como la genética o la física, o ámbitos enteros de conocimiento como las ciencias humanas, se alternaron con otras sobre la ciencia y los niños, nuevas metodologías de investigación en historia de la ciencia, o el uso del cine en los espacios de comunicación científica, por poner algunos ejemplos. Si bien predominaron las sesiones sobre la ciencia de los siglos XIX y XX, hubo espacio también para la ciencia medieval y moderna. Y las ponencias tuvieron por escenario todo el planeta, prestando especial atención a las ciudades como espacios de ciencia, de Bombay a Edimburgo, pasando por Barcelona, que contó con una sesión sobre «Animales políticos. Espacio urbano, historia natural e ideología», organizada por Oliver Hochadel, de la Institución

Milà i Fontanals del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Barcelona. Destacar algunos de estos temas y ponentes no es más que una de las maneras posibles de captar, en este espacio limitado, toda esa diversidad.

Imágenes fijas y en movimiento

También los efectos del «giro visual», que ha dirigido la atención de las humanidades hacia las imágenes y su interpretación, se dejaron sentir. Jennifer Rampling, de la Universidad de Princeton, analizó las ideas medievales sobre la transformación de la materia a través de las imágenes de los libros de alquimia. Rose Roberto, de la Universidad de Reading y los Museos Nacionales de Escocia, presentó un estudio sobre las imágenes de la *Enciclopedia Ilustrada Chambers* (1859-1868, con reediciones hasta 1892). Los archivos de W. & R. Chambers, la editorial de Robert Chambers, autor anónimo de los *Vestigios de una historia natural de la creación* (Londres, 1844), incluyen los bloques de madera usados en la impresión y permiten analizar la producción y el significado de las ilustraciones para la comunicación de la ciencia a un público cada vez más amplio.

El cine y la televisión estuvieron asimismo muy presentes en el congreso. Arne Schirrmacher, de la Universidad Humboldt en Berlín, analizó el documental de Jon Boorstin sobre el Exploratorium de San Francisco, un film de 1974 que contribuyó a perfilar un nuevo tipo de centro expositivo. Tim Boon, del Museo de la Ciencia de Londres, presentó un ambicioso proyecto sobre «Monumentos, *performances*, guiones y encuentros», que pretende explorar la cultura científica del siglo xx a través de los medios de comunicación. Entre otras actividades paralelas se proyectó *Containment* (2016), un film del historiador Peter Galison y el cineasta Rob Moss sobre la gestión de los residuos nucleares.

Vidas ordinarias

La historia de la ciencia ha dejado de ignorar a los técnicos invisibles y los artesanos expertos. Las ponencias de York abundaron en los saberes de cazadores, mecánicos, navegantes, impresores, agricultores... Un buen ejemplo de ello lo ofreció el estudio de Daniel Belteki, de la Universidad de Kent, sobre la ingente labor de mantenimiento que requería el instrumental de precisión del Observatorio de Greenwich y, en particular, su telescopio principal, el gran Círculo de tránsito que medía el paso de las estrellas. Pese a que el término «mantenimiento» no formaba parte del vocabulario del personal del observatorio, define bien sus tareas. No en vano David Edgerton, del Colegio King de Londres, le dedicó un capítulo de su *Innovación y tradición* (Crítica, 2007), una historia de la tecnología que critica la obsesión por la innovación y el desprecio del uso. Helen Cowie, de la Universidad de York, ofreció otro ejemplo de este enfoque, basado en el comercio de pieles de foca en la segunda mitad del siglo xix. Cazadores, zoólogos y comerciantes de pieles tejieron de un lado a otro del Atlántico una compleja red de relaciones diplomáticas, comerciales y científicas. Su preocupación por la protección de la fauna y la naturaleza no tenía motivaciones humanitarias o ambientales, sino utilitarias.

En algún caso, la marginación, supuesta o real, ha conllevado cierta notoriedad. John van Wyhe, de la Universidad Nacional de Singapur, especialista en Darwin y editor de las páginas web *Darwin Online* y *Wallace Online*, contó la historia de la relación entre Charles Darwin y A. Russel Wallace. Desde la publicación conjunta de sus primeros esquemas evolutivos, en 1858, hasta la celebración, en 1959, del centenario de la publicación de *El origen de las especies,* la relación entre ambos científicos fue presentada como un episodio ejemplar de cooperación y atribución de crédito científico. A partir de entonces, sin embargo, ha tomado cuerpo la idea de que Wallace no ha recibido la consideración debida. Su creciente popularidad, como la del constructor del cronógrafo marino, John Harrison, o la del inventor eléctrico Nikola Tesla, tiene que ver, para Wyhe, con la simpatía por el genio incomprendido.

Una de las conferencias plenarias estuvo dedicada a otro tipo de protagonistas anónimos: los integrantes de los grupos de personas que han sido objeto de diversos estudios de seguimiento desde 1946 por parte del Gobierno británico. Las circunstancias de su nacimiento, sus hábitos de vida, la configuración de sus familias, y cientos de datos más que relacionan vida y salud, han sido recogidos de forma sistemática. Helen Pearson, editora de la revista *Nature*, ha narrado esta iniciativa única en *The life project* (Penguin, 2016) y reflexionó en York sobre su significación.

Experimentos educativos

La historia de la ciencia guarda una relación tan estrecha como problemática con la educación científica. En un intento por trascender los términos habituales de este debate, Gregory Radick, de la Universidad de Leeds, presentó los resultados de un estudio experimental sobre la enseñanza de la genética. Raddick y Annie Jamieson compararon los resultados de aprendizaje de dos grupos de estudiantes. Uno de ellos había partido de las ideas de Mendel sobre la importancia del gen; el otro, en cambio, de las ideas de un científico que en su momento fue muy crítico con el determinismo genético de Mendel: Walter Frank Raphael Weldon. Los alumnos del segundo grupo fueron más receptivos a las ideas actuales sobre la importancia del contexto en el que se desarrolla el gen.

De Bikini al Brexit

En 1962, la BSHS empezó a publicar el *British Journal for the History of Science*, una revista de referencia que ha decidido sumarse a la celebración del aniversario. Su editora actual, Charlotte Sleigh, de la Universidad de Kent, acordó con Cambridge University Press la publicación de un número virtual de libre acceso que reúne los artículos seleccionados por cada uno de los nueve directores editoriales que ha tenido la revista desde 1971 (puede consultarse en www.cambridge.org/bjhs/50). Los artículos, precedidos por la motivación de su inclusión, dibujan el desarrollo de una disciplina muy porosa. Si en este congreso británico participamos historiadores de 19 países, en septiembre de 2018 la BSHS acogerá en Londres el congreso de la Sociedad Europea de Historia de la Ciencia, dedicado al tema «Unidad y desunión». Ante el Brexit, la comunidad académica presenta su cara más internacional. IyC

PARA SABER MÁS

Innovación y tradición. Historia de la tecnología moderna. David Edgerton. Crítica, Barcelona, 2007.
The life project: The extraordinary story of our ordinary lives. Helen Pearson. Penguin, Londres, 2016.
Genetic determinism in the genetics curriculum. Annie Jamieson y Gregory Radick en *Science & Education*, vol. 76, págs. 1-30, 2017.
Viewpoint, magacín de la BSHS: **http://www.bshs.org.uk/publications/viewpoint**

por Marcello Ienca



Marcello Ienca es doctorando en el Instituto de Ética Biomédica de la Universidad de Basilea y presidente del Comité de estudiantes e investigadores posdoctorales en la Sociedad Internacional de Neuroética.

El derecho a la libertad cognitiva

Una nueva técnica de neuroimagen podría revelar, e incluso modificar, nuestros pensamientos íntimos

La concepción de la mente humana como reducto inexpugnable del individuo perdura desde hace siglos, pero podría tener los días contados. Los sofisticados aparatos de neuroimagen y las interfaces cerebro-ordenador detectan la actividad eléctrica de las neuronas y permiten descifrar, e incluso alterar, las señales del sistema nervioso que acompañan a los procesos mentales. Y si bien tales avances ofrecen enormes posibilidades en el campo de la investigación médica y de la medicina aplicada, plantean un dilema ético, legal y social de primer orden: decidir en qué supuestos será legítimo acceder o interferir con la actividad neural de una persona.

Esta cuestión reviste especial relevancia en el ámbito social, puesto que numerosas neurotécnicas han traspasado el ámbito médico para entrar en el circuito comercial. Los intentos por descifrar el pensamiento a través de las neuroimágenes también han llegado a las esferas judiciales, a veces de forma científicamente cuestionable [*véase* «Tomografías y resonancias cerebrales ante los tribunales»; Scott T. Grafton y otros en Mente y Cerebro n.º 27, 2007]. En 2008, una mujer india fue acusada de asesinato y sentenciada a cadena perpetua a tenor de los resultados de una resonancia cerebral que, según el juez, revelaban «conocimiento de primera mano» sobre el crimen. El posible uso de las técnicas neurales como detector de mentiras en interrogatorios ha suscitado especial interés, y a pesar de las reservas de los expertos, algunas empresas ya están comercializando el empleo de la resonancia magnética y la electroencefalografía como métodos para discernir entre la verdad y la mentira. Por su parte, los militares están experimentando con las técnicas de control para otros fines: mejorar el estado de alerta y la atención de los combatientes a través de la estimulación cerebral.

Dado el carácter sagrado de nuestra intimidad mental, posiblemente no estaremos dispuestos a tolerar la intromisión de las técnicas que «leen» el pensamiento. De hecho, al considerar esas técnicas, la gente podría ver la necesidad de redefinir los derechos humanos elementales e incluso de crear derechos específicos en relación con la mente y el pensamiento.

Los letrados y legisladores ya comienzan a hablar del derecho a la libertad cognitiva: nos permitiría tomar decisiones libres y conscientes sobre el uso de todas aquellas técnicas que pudieran alterar nuestros pensamientos. El derecho a la intimidad mental protegería al individuo frente a la intromisión de terceros en sus datos cerebrales, así como contra la obtención de estos sin permiso expreso. La vulneración de la intimidad mental podría ser aún más peligrosa que el allanamiento de la intimidad convencional, puesto que podría excluir el razonamiento consciente, dejándonos indefensos ante la apropiación no consentida de nuestros pensamientos. Semejante riesgo no solo alude a los rapaces estudios de mercado perpetrados con estas técnicas o al abuso por parte de los tribunales, sino también a las aplicaciones virtuales que estarían afectando a los consumidores. En esta última categoría cada vez abundan más las interfaces cerebro-ordenador en *software* y *hardware* de uso generalizado. En fecha reciente, Facebook dio a conocer su intención de crear una interfaz de reconocimiento de voz para dictado con la que transcribir pensamientos directamente del cerebro al ordenador. Intentos similares están haciendo empresas como Samsung y Netflix. En el futuro, el control mental podría sustituir al teclado y al reconocimiento de voz como el canal principal para interaccionar con el ordenador.



Con la aparentemente imparable difusión de las herramientas de exploración cerebral surgirán nuevas posibilidades de uso malicioso, incluidas las que atañen a la ciberseguridad. Los aparatos conectados al cerebro con fines médicos son vulnerables a los sabotajes, y los neurocientíficos de la Universidad de Oxford plantean que esa misma vulnerabilidad afectaría a los implantes cerebrales, en un fenómeno ya bautizado como *brainjacking* («robo cerebral»). Ese uso malévolo podría obligar a redefinir el derecho a la integridad mental, ya reconocido como el derecho fundamental a la salud mental. Debería salvaguardar al individuo no solo de las enfermedades mentales sin tratamiento, sino de caer víctima de manipulaciones ilícitas y dañinas de su actividad neural por el uso malintencionado de la tecnología.

Por último, el derecho a la continuidad psicológica preservaría la vida mental de la gente frente a la alteración externa por terceros. El mismo tipo de manipulaciones cerebrales que se están estudiando con el fin de acortar el sueño de los soldados podrían ser adaptadas para exacerbar su beligerancia o su temeridad en el combate. La neurotecnología trae consigo beneficios, pero si se quieren minimizar los riesgos imprevistos será preciso iniciar un debate abierto en el que tengan voz los neurocientíficos, los expertos en legislación y ética y la ciudadanía en general.

CHRISTIAN DELLAVEDOVA

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea.

Umami

El quinto gusto básico gana protagonismo en la cocina occidental

En 1908, el profesor de la Universidad Imperial de Tokio Kikunae Ikeda identificó el glutamato monosódico como responsable de un sabor distinto del dulce, el ácido, el salado y el amargo, los gustos básicos clásicos. Halló el compuesto en el alga kombu; lo llamó *umami* («sabroso» en japonés) y lo patentó. El glutamato monosódico comenzó a comercializarse en 1909 bajo la marca Aji-No-Moto, que significa «la esencia del sabor». Se producía a partir de proteínas vegetales. En la actualidad, la biotecnología permite obtenerlo mediante la fermentación bacteriana de melazas.

Siguiendo la investigación de este nuevo sabor, en 1913, un discípulo de Ikeda aisló los inosinatos a partir del bonito seco. Ya en 1957, se identificaron los guanilatos a partir de la seta *shiitake*. Las sales sódicas de los ácidos inosínico y guanílico modulan y refuerzan el sabor que confiere el glutamato. Sus efectos más notables se producen al añadirlos a los alimentos, por lo que suelen calificarse, junto con el glutamato, de «potenciadores del sabor». Su uso está extendido en todo el mundo para una amplia variedad de alimentos.

En 1968, Robert Ho-Man Kwok, de la Fundación Nacional para la Investigación Biomédica de EE.UU., tras investigar las posibles causas de los trastornos que sufrieron unos amigos durante una cena en un restaurante chino, focalizó sus sospechas en la salsa de soja que les sirvieron. Publicó una carta en *The New England Journal of Medicine* señalando al glutamato como causante de las migrañas, palpitaciones, calambres y sudores que padecieron los comensales. Muy pronto, numerosos presuntos afectados se apresuraron a corroborar esta afectación, dándole el nombre de «síndrome del restaurante chino». Aunque la hipótesis de Ho-Man Kwok fue desmentida por estudios científicos, el glutamato tiene desde entonces cierta mala reputación.

El glutamato monosódico no es más que la sal sódica del ácido glutámico, uno de los 20 aminoácidos que forman las proteínas y que nuestro organismo es capaz de sintetizar. Opera en las neuronas a modo de neurotransmisor.

El umami está presente en gran variedad de alimentos: champiñones, jamón ibérico, queso parmesano y, curiosamente, la leche materna. Es el sabor típico de la salsa de soja y de los extractos de carne y pescado, y el que explica que las carnes de ternera, cerdo y cordero gusten tanto a la población. De ahí que todos los proyectos para conseguir «carnes vegetales» lo tengan en cuenta.

También las fermentaciones guardan relación con el umami. Pensemos en las elaboraciones a base de pescado fermentado como el tradicional *surströmming* sueco o todas las variaciones ancestrales del *ichii* japonés. Actualmente se está recuperando una preparación de marcada connotación umami: el olvidado *garum*, el líquido producido en la fermentación de las vísceras de pescado, un producto muy apreciado en el Imperio romano. Numerosos cocineros han rescatado la técnica: Ricard Camarena con su salsa española de bonito con *garum* de anchoa, Kiko Moya con la yema de huevo en salazón, *garum* y huevas de pescado, o Pere Planagumà y su atrevido helado de requesón, *garum*, albahaca y tomate.

ALGA KOMBU

CORTESÍA DE PORTO-MUIÑOS

Asociada también al umami encontramos la cocina *nikkei* (término japonés derivado de *nikkeijin*, que define a los emigrantes japoneses). Y es en Perú, cuya gastronomía está cada vez más marcada por la mezcla de culturas, donde la fusión *nikkei*-umami tiene una gran importancia. Mitsuharu Tsumura, chef del Maido, en Lima, uno de los restaurantes *nikkei* más emblemáticos del mundo, elabora preparaciones como el *Pescado Misoyaki* (pescado marinado en caldo de *miso* dulce con puré de camote y beicon ahumado) y el *Salmón Yuanyaki* (salmón marinado en salsa de cítricos y soja), dos platos con una marcada presencia del sabor umami.

Aunque en la cocina occidental todavía existe cierta reticencia a considerarlo un gusto básico, los científicos ya han identificando los receptores de las papilas gustativas asociados al umami [*véase* «El sentido del gusto», por David V. Smith y R. F. Margolskee; Investigación y Ciencia, mayo de 2001].

En julio de 2016, Katarzyna Stanska y Antoni Krzeski, de la Universidad Médica de Varsovia, publicaron una revisión en el *Index Copernicus Internacional* titulada «The umami taste: From discovery to clinical use», donde, además de ratificar las tres sustancias responsables del sabor umami (glutamato, inosinato y guanilato) y los receptores gustativos correspondientes, indicaban que una gran cantidad de estudios demuestran que estos compuestos provocan secreción salival, aumentan el apetito e incrementan la palatabilidad de los alimentos. Ello explica que favorezcan la ingestión. Asimismo, se ha hallado cierta relación entre el consumo de elaboraciones con gusto umami y el descenso de la obesidad. Los estudios sugieren que los compuestos responsables de este sabor están involucrados en el mecanismo que aumenta la saciedad y reducen la recuperación post-ingestiva del hambre.

La aplicación gastronómica del umami puede unir, por tanto, lo apetecible con lo saludable. La interacción entre la cocina y la nutrición tendrá mucho que decir sobre el futuro del quinto gusto básico.



URBANISMO SOSTENIBLE

Las ciudades podrían mejorar la vida de sus habitantes y la salud del planeta si contasen con una gestión adecuada de los recursos energéticos, hídricos, alimentarios y minerales

William McDonough



William McDonough es arquitecto. Pionero en urbanismo sostenible, es fundador de Willam McDonough + Partners, McDonough Innovation y del instituto de innovación de productos Cradle to Cradle («de cuna a cuna»).

HARRY CAMPBELL

EN SÍNTESIS

Para ser sostenibles, las ciudades deberían diseñarse atendiendo a los ciclos que sigue la naturaleza: aprovechando al máximo la luz solar y reutilizando los desechos como nuevos recursos.

Ya existen infraestructuras basadas en tales principios. Dos ejemplos son el Park 20|20, en Holanda, y el centro de investigación Sustainability Base, en California.

La misma idea puede aplicarse a ciudades enteras. Un ejemplo prominente es la ciudad de Curitiba, en Brasil, la cual recicla el 70 por ciento de sus desechos.



LAS CIUDADES ALBERGAN A MÁS DE LA MITAD DE LA POBLACIÓN mundial y ejercen una creciente presión sobre la Tierra. Producen hasta un 70 por ciento de las emisiones mundiales de CO_2, consumen ingentes cantidades de agua, degradan la calidad de este recurso y generan montañas de residuos. Su destino determinará la evolución del planeta. Los núcleos urbanos se están expandiendo con rapidez: según la ONU, hacia 2030 las ciudades albergarán 5.000 millones de personas, la mitad de las cuales pasarán sus días en hogares, escuelas, lugares de trabajo y parques que aún no existen.

Hacer las ciudades tan sostenibles como sea posible supone un enorme reto. Pero se trata de un desafío estimulante, ya que las urbes desempeñan un papel clave en la tarea de aportar soluciones para hacer más sostenible nuestro planeta. Constituyen motores de innovación y espíritu emprendedor. Las redes de municipios están demostrando la importancia de los ayuntamientos a la hora de aunar fuerzas, establecer objetivos ambientales y ejercer su liderazgo a escala mundial. Desde megalópolis hasta ciudades de tamaño medio, alcaldes, concejales, inversores, economistas y planificadores están respondiendo ante la urgente necesidad de rediseñar desde cero los elementos básicos de unas ciudades que crecen con rapidez. La manera en que se replantee el paisaje urbano y se planifique su crecimiento repercutirá profundamente en el futuro de todas las formas de vida de la Tierra.

Numerosas urbes están dando pasos significativos para reducir la contaminación del aire y el agua; se están volviendo «menos malas». Por sí sola, sin embargo, la eficiencia no bastará para encaminarnos hacia un futuro positivo. Si las ciudades lograran ser eficientes y al mismo tiempo «mejores» —por ejemplo, convirtiendo los residuos en abonos para la producción alimentaria— podrían llevarnos hacia el futuro que queremos, en lugar de limitarse a reducir los impactos de lo que no deseamos. Se trata de ser mejor, no solo menos malo.

UNA CLARA FUENTE de inspiración para refundar las ciudades y su relación con el entorno procede de la manera en que opera el mundo natural. En esencia, este funciona gracias a la energía del sol, la cual interacciona con la geoquímica del planeta para mantener unos sistemas biológicos productivos y con capacidad de regeneración. Los sistemas humanos que se rijan por las mismas leyes podrán aproximarse a la eficiencia de los sistemas naturales. Tales leyes se reducen a tres principios clave: equiparar residuos con alimentos, aprovechar al máximo la energía solar y rendir homenaje a la diversidad.

Los desechos no existen en la naturaleza, ya que cada organismo contribuye a la salud del conjunto. Los frutos caen de los árboles y se descomponen en forma de alimento para otros seres vivos. Las bacterias y los hongos se alimentan de los residuos orgánicos de los árboles y de los animales que ingieren sus frutos. Como resultado, depositan en el suelo nutrientes que los árboles, a su vez, aprovechan para crecer. Los restos de unos organismos se convierten así en el alimento de otros. Los nutrientes fluyen en ciclos regenerativos «de cuna a cuna»: nacimiento, descomposición y renacimiento. Los residuos equivalen a alimentos.

Hoy en día nuestras ciudades están diseñadas para un flujo lineal. Los nutrientes biológicos, como los alimentos y la madera, y los técnicos, como metales y plásticos, entran por un extremo y, una vez usados, se desechan por el otro. Después de haber cribado algunos residuos reciclables, como los metales, el papel y ciertos plásticos, el resto se dirige a vertederos e incineradoras. El proceso consiste en tomar, hacer y tirar. Pero, así como hemos rediseñado ciertos artículos de consumo para ser desmontados, reciclados o reutilizados, también podemos planificar las ciudades según un flujo circular similar: tomar, hacer, retomar, rehacer, reponer.

En la ciudad circular los desechos se convierten en recursos. Consideremos el caso de las aguas residuales. En la ciudad lineal, las depuradoras procesan los residuos alimenatrios y los desechos de origen humano (los cuales contienen valiosos minerales, como los fosfatos) y los vierten en los ríos en forma de contaminación. Los agricultores adquieren entonces más fosfatos de Marruecos u otros países para fabricar nuevos abonos con los que producir más alimentos en suelos que han perdido tales minerales. En la ciudad circular las depuradoras se convierten en fábricas de abonos. El carbono, el fosfato y el nitrógeno que salen de ellas constituyen un bien potencial para el suelo, no un perjuicio para el río más cercano. Las ciudades circulares explotan las aguas residuales para obtener fosfatos, los cuales convierten en abonos para parques y huertos situados en las azoteas de los edificios y en las granjas y bosques que rodean a los núcleos urbanos. Tal planteamiento suprime la necesidad de adquirir más fosfatos de fuentes lejanas y transportarlos a nuestras ciudades. También evita el gasto de energía y las emisiones de carbono asociadas a la explotación minera y el transporte. Ostara Nutrient Recovery Technologies, una compañía de Vancouver, ha sido pionera en aprovechar lodos de depuradora para obtener estruvita, un mineral fosfato, y fabricar abonos.

La misma idea se extiende a todos los ámbitos. Las ciudades circulares diseñan materiales con la mira puesta en su próximo uso, no en su caducidad. Por ejemplo, las nuevas técnicas permiten procesar de forma rentable los microcircuitos de los teléfonos móviles, de modo que todos los metales preciosos y minerales de tierras raras se recuperen y sean reutilizados en nuevos productos electrónicos.

Un segundo principio fundamental de la naturaleza y de lo que podríamos llamar las «ciudades positivas» consiste en que todo está impulsado por el sol y, en ocasiones, como ocurre en Islandia, por la energía geotérmica. Los árboles y las plantas sintetizan nutrientes a partir de la luz solar, un elegante y eficiente proceso que aprovecha la única fuente perpetua de energía existente en el planeta. Los edificios pueden explotar la radiación solar transformándola directamente en energía y usándola como fuente de calor y luz natural. Otro recurso proviene del viento (en última instancia, un flujo térmico impulsado por el sol). En conjunto, las energías eólica, solar y geotérmica pueden satisfacer de forma rentable las necesidades de ciudades, regiones e incluso países. Urbes como San Francisco están logran-

DATOS

Población mundial que habita en ciudades: **55 %**

5000 millones

vivirán en ciudades hacia 2030

Ciudades de EE.UU. comprometidas a funcionar al 100 % con energías renovables: **27**

Residentes que utilizan el autobús en Curitiba, Brasil: **85 %**

FUENTES: *THE WORLD'S CITIES IN 2016: DATA BOOKLET*, NACIONES UNIDAS, 2016 (*población en ciudades*); SIERRA CLUB (*ciudades estadounidenses*); *LOW CARBON GREEN GROWTH ROADMAP FOR ASIA AND THE PACIFIC*, COMISIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL DE LAS NACIONES UNIDAS PARA ASIA Y EL PACÍFICO, 2012 (*Curitiba*)

do progresos notables para alcanzar su compromiso de funcionar solo con energías renovables de aquí a quince años.

El tercer principio clave, la diversidad, lo observamos en todos los ecosistemas saludables. Cada organismo reacciona al entorno de una forma única, y esa respuesta se coordina con la de otros para sustentar el conjunto. Cada uno se adecúa a su sitio y en cada sistema prosperan los mejor adaptados. Los urbanistas que aspiran al resultado óptimo prestan atención a las ecologías locales: evalúan la geología, la hidrología, la vegetación y el clima, a lo que incorporan la historia natural y cultural. Al combinar ese amplio cúmulo de factores hallan pautas apropiadas para desarrollar el paisaje urbano. Con ello crean nuevas posibilidades para un crecimiento positivo que mantenga la vida.

NUESTRO OBJETIVO último es diseñar una ciudad que permita a sus habitantes vivir y trabajar en un mismo barrio. Si los residentes pueden reciclar teléfonos móviles en fábricas limpias que encajen en el ecosistema urbano, no hay razón para relegar dichas infraestructuras a zonas marginales de las afueras. En una ciudad positiva no existe la necesidad de establecer zonas por la preocupación de que ciertas actividades puedan ser poco seguras o saludables. Las fábricas podrían ubicarse en barrios residenciales limpios y dar empleo a personas que irían a trabajar a pie o en bicicleta. A su vez, ello reduciría de manera notable el uso de transporte, el cual consume enormes recursos y tiempo. Y si la comida fresca y saludable se produjera en los tejados, siguiendo el ejemplo de la nueva fábrica Soath Side Soapbox de Method Products, en Chicago, eso no solo permitiría aprovechar los restos orgánicos locales para obtener alimentos, sino que los trabajadores de esas granjas también podrían vivir en la zona.

Imagine que todas nuestras acciones constituyen gestos que mantienen la vida, proporcionan placer y se hallan en armonía con la naturaleza. Los edificios funcionan a modo de árboles: absorben carbono, producen oxígeno, destilan agua, dotan de hábitat a miles de especies, convierten la energía solar en toda la energía térmica y eléctrica que necesitan e incluso venden el exceso a sus vecinos. Edificios con humedales y jardines botánicos recuperan nutrientes de aguas residuales y depuran el resto para sus propias cocinas y cuartos de baño. Abundan el aire limpio, las plantas y la luz natural; los edificios y las comunidades funcionan como sistemas de apoyo a la vida.

Desde esta óptica, podemos imaginar alimentos y materiales producidos en el entorno rural circundante a partir de las herramientas y la tecnología creadas en los núcleos urbanos. La ciudad retorna residuos en forma de materia prima que recarga el sistema y genera nuevos recursos. Todo se mueve así en ciclos regenerativos, de las áreas urbanas a las rurales y de las rurales a las urbanas, en redes naturales y culturales que ponen en circulación el alimento biológico y técnico. El metabolismo de una ciudad viva y positiva permite que comunidades humanas y mundo natural prosperen juntos. Si queremos que nuestras ciudades representen un sustento y un beneficio real para todos, hemos de contemplar esa idea como una verdad literal y estratégica que debería materializarse en todos nuestros diseños.

Resulta imperioso establecer los principios de un futuro utópico. Pero ¿pueden ponerlos en práctica las ciudades ya existentes? Algunos casos recientes están demostrando cómo hacerlo.

La renovación y expansión del Ford Rouge Center, en Michigan, ha transformado un histórico complejo de fabricación de automóviles y camiones en un modelo de sostenibilidad industrial. El plan maestro incorporó una azotea verde de cuatro hectáreas: el núcleo de un sistema de jardines húmedos, pavimento permeable, barreras vegetales y biofiltros. El proyecto metamorfoseó un centenario complejo industrial abandonado en un próspero ecosistema de aguas pluviales que captura, limpia y vierte agua al colindante río Rouge, lo que mantiene el buen estado de la vertiente fluvial. El chorlitejo colirrojo, ave nativa de la zona, regresó a sus nidos una semana después de que se completara su construcción.

Otro modelo es Sustainability Base, las nuevas instalaciones de la NASA para su Centro de Investigación Ames, en California, las cuales pueden proporcionar la calefacción, refrigeración y energía necesarias para su funcionamiento —e incluso generar un excedente— a partir de radiación solar, geotermia y una pila de combustible avanzada. El tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo in situ.

El galardonado Park 20|20, en Holanda, nos proporciona otro ejemplo. Se trata de un variopinto conjunto de edificios y espacios abiertos que alcanza ya más de 11 hectáreas. Los ciudadanos pueden acceder fácilmente al parque en tren, autobús o bicicleta. Una serie de zonas verdes, plazas, jardines y pasarelas sobre canales conectan la comunidad. El tamaño, la estructura y la orientación de cada edificio se han optimizado para captar la energía del sol. Las construcciones cuentan con sistemas de gestión de energía, agua y residuos, de forma que actúan como un solo organismo.

¿PODEMOS TRASLADAR tales logros a ciudades enteras? Algunos lugares fascinantes pueden servirnos como fuente de inspiración. Uno de ellos es la ciudad de Curitiba, en Brasil.

Curitiba comenzó a transformarse en los años setenta de la mano del célebre arquitecto y urbanista Jaime Lerner, quien entre los setenta y los noventa fue alcalde en tres ocasiones. Durante su primer mandato se dio cuenta de que la ciudad (un núcleo urbano pobre con cientos de miles de habitantes) necesitaba mejorar su transporte público. Debido al elevado coste de un sistema

de metro o ferrocarril, solicitó a Volvo que fabricase 270 autobuses articulados y que lo hiciese en la propia ciudad, lo que supuso una fuente de empleo para la población. El ayuntamiento también contrató mano de obra local para construir unas marquesinas de autobuses, o «tubos», desde las que los ciudadanos podían viajar a cualquier parte por un precio fijo. En lugar de tener que pagar al subir al autobús, un proceso lento, Lerner creó una forma de prepago que permitía acceder al vehículo de inmediato. Eso redujo los tiempos de espera e hizo eficiente el sistema entero.

Debido al acelerado crecimiento de Curitiba, la basura se acumulaba en callejones estrechos, donde los camiones no podían alcanzarla. Lerner estableció un programa para enseñar a los niños a separar la basura y después los mandó a casa para que instruyesen a sus familias. A cambio de clasificar los residuos, los ciudadanos obtenían billetes de autobús o alimentos frescos. De pronto, todo el mundo comenzó a usar el transporte público. Hoy, el 85 por ciento de los habitantes de Curitiba utiliza el autobús y el 90 por ciento recicla. La ciudad en conjunto recicla el 70 por ciento de sus desechos: uno de los porcentajes más altos del mundo.

La innovación se fue ampliando. En lugar de construir una gran biblioteca en el centro de la ciudad, el municipio creó una red de 50 pequeños «Faros de Conocimiento» distribuidos por todos los barrios a fin de que los niños pudieran acceder a ellos a pie. Por supuesto, fueron obreros locales quienes construyeron los coloridos edificios. Las bibliotecas colaboran con las escuelas municipales y ponen a disposición de todos los ciudadanos miles de libros y acceso gratuito a Internet. Estas y otras iniciativas convirtieron a Curitiba en un lugar que permite compaginar vida y trabajo.

Ahora imagine que un núcleo urbano como Manhattan adoptara planteamientos similares y cultivara alimentos en las azoteas de cientos de colegios y hospitales, lo que supondría una fuente tanto de comida como de trabajo. Los niños podrían emplear los sensores ópticos conocidos como «globos oculares» para clasificar la basura, retirar los plásticos y llevarlos hasta los centros de reciclaje para que no acabaran en el océano; a cambio, recibirían una compensación en juguetes. Las fábricas limpias se ocuparían de reconvertir los plásticos en monómeros que pudieran aprovecharse de nuevo. Todo ello funcionaría con energía solar y los materiales circularían en ciclos de alimentación biológica y técnica.

Lo que estamos persiguiendo no es más que lo que podríamos denominar una «buena vida»: una vida segura, digna y creativa. Las ciudades positivas son los lugares en los que eso puede suceder. Si se diseñan y gestionan con esta perspectiva en mente lograremos progresos. Los derechos de la humanidad y los de la naturaleza deben coexistir para que podamos armonizar la ciudad y las zonas rurales que la rodean.

Las ciudades están planificadas, pero conforman también un organismo. Como señaló hace años el antropólogo Claude Lévi-Strauss, son «algo vivido y algo soñado». En nuestra calidad de constructores de lugares vivos, no podemos evitar proyectarnos sobre el paisaje. Pero, a medida que soñamos con nuestras ciudades ideales y hacemos aparecer la trama humana en la urdimbre geológica del planeta, podemos comenzar a ver el verdadero carácter del entorno que habitamos. Entonces, al modelar nuestras ciudades estaremos construyendo lugares que celebren tanto la creatividad humana como una armoniosa relación con nuestro planeta. Estaremos forjando una nueva geografía de la esperanza. IyC

APROVECHAR LA BASURA

Diseñar ciudades sostenibles exigirá reconvertir los residuos en materias primas

Michael E. Webber



Michael E. Webber es director adjunto del Instituto de la Energía, codirector del Incubador de Energía Limpia y profesor de recursos energéticos en la Universidad de Texas en Austin. Su último libro es *Thirst for power: Energy, water, and human survival* (Yale University Press, 2016).

El 20 de diciembre de 2015, el derrumbe de una montaña de residuos urbanos en la ciudad china de Shenzhen causó al menos 69 víctimas mortales y destruyó decenas de edificios. El desastre inspiró las torres de desechos retratadas en 2008 en la distópica película infantil *WALL-E*, que describía la horrible pero real perspectiva de una Tierra devastada por la acumulación incontrolada de basura. Un modo eficaz de hacer sostenible una ciudad consiste en reducir todos los flujos de desechos y emplearlos como recursos. Los residuos de un proceso se convierten así en la materia prima de otros.

Buena parte de la población mundial continúa migrando hacia las ciudades, lo que sitúa a los núcleos urbanos en primera línea a la hora de solucionar el problema de los recursos a escala mundial. Los alcaldes asumen cada vez más responsabilidades relacionadas con esta cuestión, sobre todo en países donde el entusiasmo nacional por las



HARRY CAMPBELL



MÁQUINAS excavando entre escombros en Shenzen, China, tras el derrumbe de una montaña de residuos que dejó enterrados decenas de edificios.

GETTY IMAGES

cuestiones ambientales se ha enfriado. Los acuerdos del clima alcanzados en 2015 en París también reconocieron el papel clave de las ciudades. Más de un millar de alcaldes acudieron a la capital francesa para compartir sus compromisos de reducir las emisiones de CO_2. Modificar los códigos de construcción e invertir en eficiencia energética son solo dos medidas iniciales que, según numerosos dirigentes, podrían ponerse en marcha mucho más rápido desde los ayuntamientos que desde los Gobiernos nacionales.

Es lógico que las ciudades den un paso adelante. La población de algunas de ellas (Nueva York, Ciudad de México, Pekín) supera a la de países enteros, y el paisaje urbano emerge allí donde se concentran numerosos desafíos vitales. Las ciudades pueden liderar el cambio porque son capaces de aportar soluciones con rapidez y porque constituyen laboratorios vivientes para mejorar la calidad de vida sin agotar los recursos del planeta, contaminar el aire y el agua o dañar nuestra salud.

En las ciudades abunda la energía desperdiciada, el CO_2 desperdiciado, la comida desperdiciada, el agua desperdiciada, el espacio desperdiciado y el tiempo desperdiciado. Reducir cada flujo de residuos y gestionarlo como un recurso, en lugar de como un coste, podría solucionar múltiples problemas a la vez y crear un futuro más sostenible para miles de millones de personas.

LA CONTAMINACIÓN COMO SOLUCIÓN

En la historia hallamos abundantes lecciones sobre los residuos. En el siglo XIX, el médico londinense John Snow dedujo que los devastadores brotes de cólera que habían azotado la capital británica en 1848 y 1854 se debieron a que los pozos de agua estaban contaminados por el alcantarillado. La construcción de cloacas era la solución más obvia, pero los dirigentes políticos desestimaron los hallazgos de Snow porque sus ideas no encajaban con la ideología predominante y porque el proyecto se consideraba demasiado caro. Un rechazo similar sufren los climatólogos actuales, que sostienen que nuestros residuos consumen nuestras vidas, aunque de una forma más lenta e indirecta, y que solucionar el problema requerirá grandes inversiones en nuevas infraestructuras. Más adelante, Snow sería reivindicado como un héroe —quizá les aguarde el mismo destino a nuestros científicos de hoy— después de que otros dirigentes planificasen un alcantarillado de casi 2000 kilómetros en una ciudad de tres millones de personas y pusieran así fin al problema del cólera. El proyecto también creó las encantadoras riberas que aún conforman el paisaje londinense y por las que pasean a diario un gran número de personas.

Hoy, sin embargo, no basta con eliminar residuos. Tras reducirlos, deberíamos cerrar el círculo y volver a aprovecharlos. Primero hemos de limitar los desechos; luego, reutilizarlos.

Este planteamiento comienza con la necesidad de cambiar nuestro concepto de contaminación. Raj Bhattarai, ingeniero del servicio municipal de aguas de Austin, en Texas, me señaló una nueva definición: la contaminación son recursos fuera de lugar. Las sustancias resultan nocivas si se encuentran en el sitio inapropiado: en nuestro cuerpo, el aire, el agua. Pero, en el lugar correcto, resultan útiles. Así, en lugar de enviar nuestros residuos a vertederos y pagar una factura, estos pueden incinerarse para generar electricidad. Y del alcantarillado de un millón de personas pueden extraerse anualmente millones de dólares en forma de oro y otros metales preciosos que luego pueden emplearse en procesos de fabricación local.

Esa idea encaja con el concepto más amplio de «economía circular», donde los diferentes procesos y acciones de la sociedad se retroalimentan de forma beneficiosa. Por expresarlo de un modo simple: el residuo es lo que queda cuando se agota la imaginación.

MENOS ES MÁS

Las fugas de las tuberías de agua representan el lugar más obvio por el que comenzar. Por increíble que parezca, entre un 10 y un 40 por ciento del agua urbana suele perderse en las tuberías. Y, dado que se trata de agua previamente saneada y puesta en circulación me-

diante bombas, las fugas suponen también un desperdicio energético.

El consumo energético es, en sí mismo, tremendamente derrochador. Más de la mitad de la energía que gasta una ciudad se disipa por chimeneas, tubos de escape, la parte trasera de radiadores, aires acondicionados y otros aparatos. Hacer más eficiente todo ese equipamiento reduciría la cantidad de energía que necesitamos para producir, distribuir y limpiar.

La basura constituye otro flujo de desechos que debe mejorarse. EE.UU. genera diariamente casi dos kilos de residuos sólidos por habitante. A pesar de los esfuerzos por compostar o reciclar una parte, más de la mitad aún termina en vertederos. Disminuir el empaquetado de los productos puede servir para reducir ese volumen y generar a la vez otros beneficios. Algunos grandes almacenes, como Walmart, han comprobado que menguar el embalaje les permite usar menos camiones en la distribución y disponer de más espacio en las estanterías para colocar productos.

El desperdicio de alimentos es desgarrador. A pesar del hambre en el mundo, los estadounidenses tiran entre el 25 y el 50 por ciento de su comida. Los alimentos requieren enormes cantidades de energía, terreno y agua para cultivarlos, producirlos, almacenarlos, prepararlos, cocinarlos y tirarlos; por tanto, su desperdicio deja una mella considerable. Algunas iniciativas surgidas en EE.UU., como la campaña I Value Food, y en otros países constituyen un primer paso hacia la solución de un problema tan fundamental.

INCORPORAR LOS RESIDUOS

Una vez reducido el flujo de residuos, las ciudades deberían reutilizarlos. Ya han comenzado a surgir algunos proyectos atractivos. En Zúrich la basura se quema de forma limpia, y en Palm Beach, en Florida, se recupera más del 95 por ciento de los metales contenidos en las cenizas resultantes de la combustión. Algunas aldeas rurales, como Jühnde, en Alemania, generan suficiente biogás a partir del ganado y el estiércol de cerdo para calentar o abastecer de energía a buena parte de sus hogares. Mi grupo de investigación de la Universidad de Texas en Austin ha demostrado que una cementera de New Braunfels, en Texas, puede reemplazar el carbón por pellas de combustible fabricadas a partir de plásticos no reciclables, lo que evita las emisiones de CO_2 y las repercusiones asociadas a la explotación del carbón.

Cada residuo que acaba en un vertedero posee algún valor. Las ciudades pueden capturar el metano que emana de la descomposición de ciertos residuos —una clara mejora con respecto a quemar sin más el gas o dejar que escape a la atmósfera, donde absorbe mucho más calor que la cantidad equivalente de CO_2— y convertirlo en electricidad. De hecho, los vertederos de Vancouver extraen el metano y lo queman para calentar los invernaderos de tomates de las inmediaciones.

Aun así, los vertederos también tienen fugas. Ello motivó a Vancouver, resuelta a convertirse en la ciudad más verde del planeta, a facilitar a sus residentes contenedores separados para la basura y la materia orgánica. Las autoridades esperan que los ciudadanos los empleen correctamente y han dispuesto inspectores para comprobar que los operarios vierten los desechos separados. La ciudad produce metano a partir de los residuos orgánicos y genera sólidos, denominados «enmiendas», que mejoran la fertilidad del suelo. Todo ello soluciona varios problemas a la vez (se ahorra dinero en energía que de otro modo se habría contratado, se reduce la necesidad de vertederos y se evita el uso y los daños innecesarios al terreno) al tiempo que mejora la agricultura.



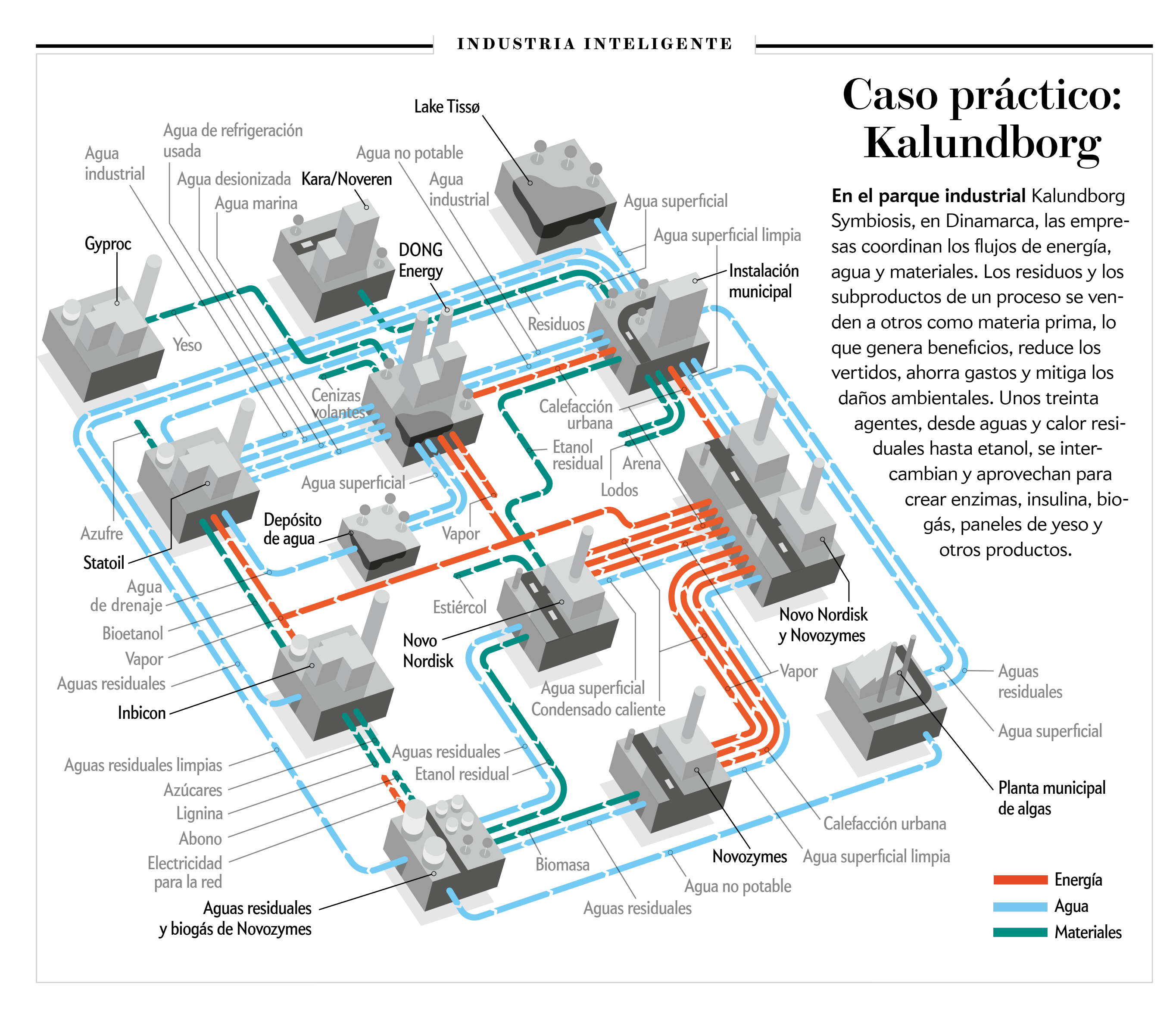
VANCOUVER quema el metano capturado en vertederos para calentar los invernaderos de tomates de Village Farms.

CORTESÍA DE VILLAGE FARMS

Austin procesa de forma similar sus lodos de aguas residuales. Estos pasan a través de digestores anaeróbicos donde se sintetiza biogás, el cual se vende o se usa en las mismas instalaciones para generar calor. Los restos sólidos se transforman en una enmienda para suelos llamada Dillo Dirt (en referencia al armadillo, un animal de la zona). La ciudad gana dinero vendiéndola y compensa así parte del coste del tratamiento de aguas. Aunque el compostaje es una tendencia creciente y popular entre muchos residentes —y que merece la pena estudiar—, hacerlo mal puede conllevar más emisiones de carbono. En el caso de Austin, es mejor que los habitantes tiren los restos de comida por el desagüe y por una trituradora y que las máquinas industriales de las depuradoras lleven a cabo el compostaje con una eficiencia mayor.

El calor desperdiciado ofrece otra posibilidad. Capturarlo no es sencillo, ya que servirse de bajas temperaturas para obtener electricidad resulta complicado. La NASA desarrolló unos generadores termoeléctricos para sus naves espaciales, pero la técnica es cara e ineficiente. No obstante, ya están comenzando a aparecer materiales avanzados que logran convertir el calor en electricidad con mejor rendimiento. Un buen punto de partida es el agua caliente que se vierte por el desagüe mientras fregamos los platos, lavamos la ropa o nos duchamos. Sandvika, un barrio de las afueras de Oslo, cuenta con enormes intercambiadores de calor a lo largo de los desagües para caldear edificios cercanos o descongelar aceras y carreteras. En verano, parte de ese calor puede aprovecharse para enfriar esos mismos edificios. A Vancouver le atrajo tanto la idea que acabó empleando aguas residuales para calentar cientos de edificios y la Villa Olímpica.

Kalundborg Symbiosis, en Dinamarca, uno de los principales ejemplos del planteamiento de ciclo cerrado, llevó la idea aún más lejos. En este parque industrial conviven siete compañías e instalaciones municipales (de electricidad, agua, aguas residuales y residuos sólidos) conectadas entre sí, de forma que los desechos de una se convierten en los recursos de otra. Por sus tuberías y cables circulan vapor, gas, electricidad, agua y residuos para mejorar la eficiencia total y reducir el conjunto de desechos, incluidas las emisiones de CO_2. Por ejemplo, las aguas residuales de la refinería de petróleo fluyen hacia la central eléctrica, donde se aprove-



Caso práctico: Kalundborg

En el parque industrial Kalundborg Symbiosis, en Dinamarca, las empresas coordinan los flujos de energía, agua y materiales. Los residuos y los subproductos de un proceso se venden a otros como materia prima, lo que genera beneficios, reduce los vertidos, ahorra gastos y mitiga los daños ambientales. Unos treinta agentes, desde aguas y calor residuales hasta etanol, se intercambian y aprovechan para crear enzimas, insulina, biogás, paneles de yeso y otros productos.

chan para estabilizar las cenizas generadas por la combustión del carbón. La refinería también envía vapor residual a la empresa Novo Nordisk, que se vale de su calor para producir la mitad del aporte mundial de insulina mediante bacterias y levaduras. El parque se asemeja a un organismo industrial vivo que ha crecido económicamente con emisiones reducidas o nulas.

DECISIONES BASADAS EN DATOS

¿Puede replicarse el modelo de Kalunborg en ciudades de todo el planeta? Sí, pero solo si diseñamos ciudades inteligentes. Un parque industrial es flexible, pues cuenta con escasos inquilinos y gestores, pero en una ciudad conviven multitud de personas y organizaciones que cada día toman decisiones independientes sobre energía, agua y residuos. Integrarlas requiere un giro cultural hacia la cooperación impulsado por la tecnología. Las ciudades inteligentes contarán con sensores ubicuos asistidos por aprendizaje automático y otras técnicas de inteligencia artificial. Tales avances permitirán localizar ineficiencias, reducir residuos y manejar de forma automática todo tipo de equipamiento.

Esta idea atrae a quienes desean alojar a un mayor número de personas en las ciudades sin disminuir su calidad de vida. En la India, donde la población y la salud pública constituyen un grave problema, el primer ministro, Nerendra Modi, ha anunciado su intención de convertir cien municipios pequeños y medianos en ciudades inteligentes como posible solución.

El uso del adjetivo «inteligente» implica tachar de estúpidas a las ciudades actuales. La acusación tiene sentido, pues los municipios de hoy parecen funcionar a ciegas. La Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. acaba de lanzar la iniciativa Smart & Connected Communities («comunidades inteligentes y conectadas»), la cual pretende ayudar a las ciudades a aprovechar mejor los datos. El nombre del proyecto indica también que la inteligencia ha de estar acompañada por la interconexión entre sistemas y personas.

Las ciudades inteligentes dependen de los datos procedentes de amplias redes de sensores y de algoritmos para adquirir nueva información, sacar conclusiones y tomar decisiones. Después, esos análisis se transmiten al equipamiento distribuido por la ciudad. Los contadores que hacen un seguimiento detallado del consumo de electricidad, gas natural y agua en cada momento del día, así como los electrodomésticos y los aparatos industriales, constituyen un claro punto de partida. También contamos con detectores de tráfico, controladores de la calidad del aire y

HARRY CAMPBELL (*ilustración*); FUENTE: CENTRO SYMBIOSIS, www.symbiosecenter.dk

detectores de fugas en tiempo real. El consorcio Pecan Street, en Austin, está reuniendo datos procedentes de cientos de hogares para aprender de qué modo el acceso a esos datos podría ayudar a los usuarios a modificar sus rutinas con miras consumir menos y ahorrar. Ciudades como Phoenix y bases militares como Fort Carson, en Colorado, se han comprometido a usar la energía y el agua de forma autosuficiente y a reducir a cero los residuos. Alcanzar metas tan ambiciosas requerirá un gran volumen de datos interconectados.

La posibilidad de aprovechar mejor el tiempo gracias a las mejoras en el transporte ofrecerá a los urbanitas un aperitivo de los beneficios de una ciudad inteligente. Mitigar el impacto causado por el transporte implica usar combustibles limpios, hacer los vehículos más eficientes, acortar la distancia y la duración de los trayectos, aumentar el número de viajeros por automóvil y reducir el número de desplazamientos. Si las personas viven cerca de su lugar de trabajo, pueden acudir a él caminando, en bicicleta o en transporte público. Los estudios demuestran que los carriles bici entre edificios conllevan un aumento notable del número de usuarios. Y, dado que las bicicletas ocupan mucho menos que los coches, su uso descongestiona las carreteras.



TUBOS del parque industrial de Kalundborg, en Dinamarca, que transportan vapor residual desde la central eléctrica de DONG Energy hasta compañías que lo emplean en distintos procesos de fabricación.

CORTESÍA DE KALUNDBORG SYMBIOSIS

Una ciudad sin conductores también reduciría el tiempo y el espacio que malgastamos en aparcar. Al usar coches compartidos y autónomos, en lugar de automóviles privados que pasan la mayor parte del tiempo aparcados en casa y en el trabajo, podríamos restringir las plazas de aparcamiento, lo que liberaría más espacio y descongestionaría el tráfico aún más. Un estudio del Centro de Investigación del Transporte de la Universidad de Texas en Austin concluyó que los vehículos autónomos compartidos reducirían en un orden de magnitud el número de coches necesarios en una ciudad. Además, recortarían las emisiones, a pesar del ligero aumento en el total de kilómetros recorridos debido a que los vehículos se encontrarían siempre en movimiento. En lugar de perder el tiempo conduciendo, los viajeros pueden descansar, leer el correo o hacer llamadas. Ello puede generar un valor económico y, al mismo tiempo, hacer que una persona pase menos tiempo en la oficina y llegue antes a cenar a casa.

La verdadera clave para resolver problemas básicos, como las fugas en las tuberías de agua, reside en hacer inteligentes también nuestras infraestructuras. Detectar fugas debería resultar sencillo si se instalaran contadores a lo largo del sistema de distribución. Un grupo de investigadores de Birmingham ha desarrollado un sistema de pequeños sensores de presión que monitorizan el uso de agua y detectan fugas; una mejora considerable con respecto a la vieja técnica de esperar a que alguien llame denunciando un escape a la calle. Y tal vez en un futuro podamos enviar robots por las tuberías para arreglar los desperfectos. Los sensores de alto rendimiento también permitirían hallar y predecir fugas de gas antes de que ocurran accidentes.

Es difícil predecir dónde aparecerán las primeras ciudades inteligentes conscientes del problema de los residuos. Tal vez en el Medio Oeste de EE.UU., entre aquellas urbes de más de un millón de habitantes que hoy necesitan reinventarse porque sus economías se desplomaron hace décadas. Un ejemplo podría ser Indianápolis, la cual ha de reconstruir unos sistemas de agua, desagües y cloacas que fueron diseñados hace un siglo en una serie de malas decisiones. Ahora la ciudad ha invertido en la zona centro y está resurgiendo. Pittsburgh ha movilizado sus propios recursos (un vibrante núcleo urbano, la alcaldía visionaria de William Peduto, el peso de la Universidad Carnegie Mellon) para dejar de ser conocida por sus chimeneas industriales y hacerse famosa por su inteligencia. De hecho, Uber lanzó allí su servicio de vehículos autónomos. Columbus, capital de Ohio y sede de una gran universidad, es otra ciudad donde buscar experimentos. El Departamento de Transporte de EE.UU. otorgó recientemente una ayuda de 40 millones de dólares a la ciudad para que reinventase su enfoque hacia la movilidad.

CAMINO DEL CAMBIO

No será fácil transformar unas ciudades derrochadoras en lugares que generan menos residuos y reutilizan los que quedan. Las inversiones estatales en I+D deberán combinarse con planes políticos a todos los niveles de gobierno.

La inversión debe también hacerse de forma inteligente desde un punto de vista social. Los estudios demuestran que los programas de I+D destinados a planificar ciudades inteligentes se han centrado más en la tecnología que en las necesidades de los ciudadanos. Hemos de evitar que los nuevos beneficios se acumulen en quienes ya tienen conexión a Internet y acceso a las tecnologías avanzadas, ya que eso solo ensancharía más la brecha tecnológica y otros abismos socioeconómicos.

Por último, las ciudades también necesitan crear «ciudadanos inteligentes», ya que cada uno de nosotros toma decisiones en materia de recursos cada vez que compra un producto o acciona un interruptor. El acceso a la educación y a los datos será primordial. La conexión entre ciudadanos también requiere la colaboración y la interacción vecinal: jardines, parques infantiles, espacios compartidos y centros educativos, religiosos y comunitarios han sido durante siglos algunos de los principios que han regido el diseño de ciudades prósperas. Cuanto más modernas e inteligentes se vuelvan nuestras ciudades, más podríamos necesitar esos elementos del viejo mundo para seguir juntos.



Carlo Ratti es director del Laboratorio Senseable City del Instituto de Tecnología de Massachusetts y fundador del estudio de diseño Carlo Ratti Associati.



Assaf Biderman es inventor, director adjunto del Laboratorio Senseable City y fundador de Superpedestrian, empresa centrada en el desarrollo de vehículos robóticos de una y dos plazas.



LA MOVILIDAD DEL FUTURO

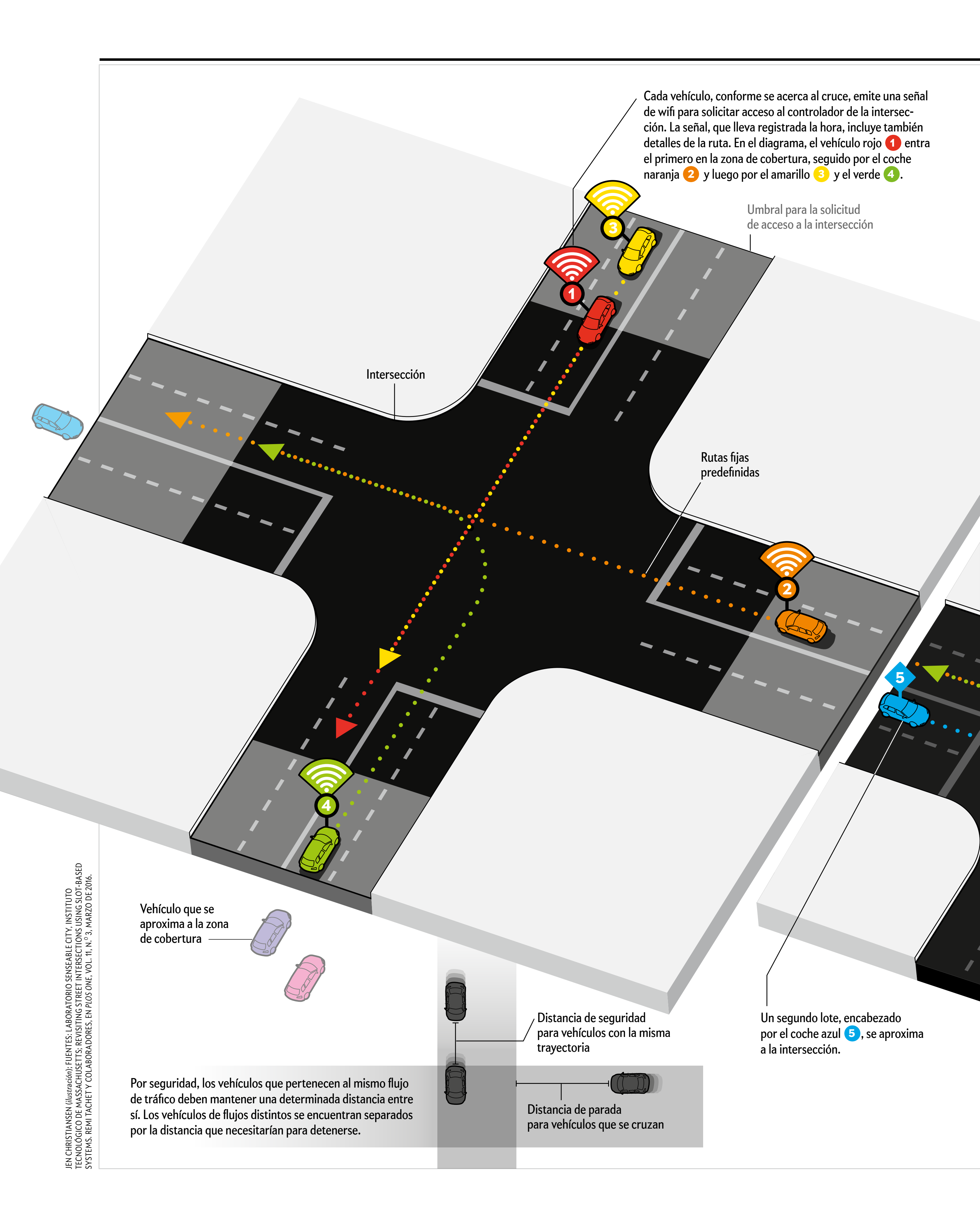
Una red móvil de cruces de tráfico inteligentes y vehículos equipados con sensores transformará nuestros desplazamientos por las ciudades

Carlo Ratti y Assaf Biderman

Los coches y las ciudades guardan una relación complicada. Nos inclinamos a pensar que cada vez son más incompatibles, asediados como estamos hoy en día por una congestión viaria y una contaminación atmosférica que no han cesado de empeorar. Sin embargo, durante el siglo xx el automóvil dejó una de las más duraderas improntas en los planes urbanísticos. Como el arquitecto de origen suizo Le Corbusier declaró en su libro *Urbanismo*, de 1925, «el automóvil ha derribado completamente todas nuestras antiguas ideas sobre el urbanismo».

Casi 100 años después, nos encontramos en un punto de inflexión similar. En primer lugar, se estima que para el año 2050 la demanda de transporte urbano duplicará con creces la actual. De ello se sigue que, tan solo para mantener las congestiones de tráfico en los niveles a menudo inaceptables que padecemos ahora, tendremos, como mínimo, que duplicar la capacidad de las calles. En segundo lugar, gracias a la rápida convergencia de las tecnologías de la información y la comunicación, la robótica y la inteligencia artificial, nuestros sistemas de movilidad (turismos, autobuses y otros medios de transporte) están experimentando grandes transformaciones. De nuevo se hallan en posición de remodelar radicalmente el paisaje de las ciudades.

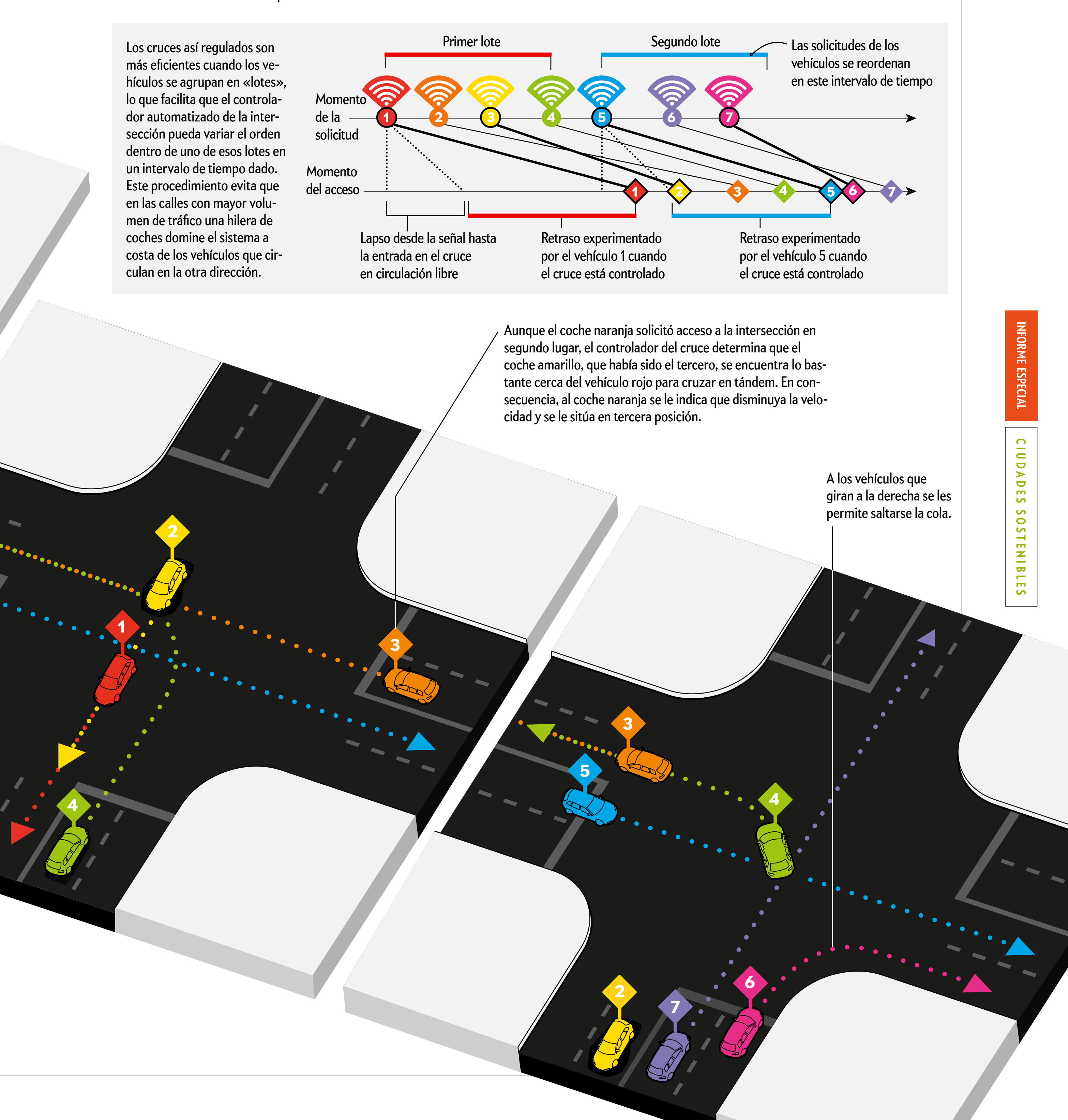
Los vehículos autoconducidos (o autónomos) lideran el avance. En los últimos decenios, los coches se han ido alejando de esos sistemas mecánicos que Henry Ford podría haber reconocido y se han ido convirtiendo en auténticos ordenadores sobre ruedas. En la actualidad, el automóvil medio está equipado con una serie de sensores que recogen datos internos y externos para un funcionamiento seguro y eficiente. Empresas



JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); FUENTES: LABORATORIO SENSEABLE CITY, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS; REVISITING STREET INTERSECTIONS USING SLOT-BASED SYSTEMS, REMI TACHET Y COLABORADORES, EN *PLOS ONE*, VOL. 11, N.° 3, MARZO DE 2016.

Control del tráfico

Los vehículos autoconducidos permitirían a los planificadores urbanos sustituir los semáforos por intersecciones en las cuales a cada vehículo que se aproxima se le asigna una ventana de tiempo (un *slot*) para pasar. Las investigaciones realizadas sugieren que, en comparación con la regulación mediante semáforos, este sistema conseguiría duplicar el número de vehículos que atraviesan un cruce en un tiempo dado.



como Waymo (escindida de Google), Cruise (adquirida por General Motors), Otto (adquirida por Uber), Zoox y nuTonomy están desarrollando sensores adicionales que pueden «ver» una calle de un modo muy parecido a como lo hacen nuestros ojos. Cuando se introduce esa información en un sistema de inteligencia artificial de a bordo, se logra un vehículo plenamente autónomo, capaz de circular en redes viarias de tráfico denso sin ninguna interacción humana.

Los vehículos autónomos nos liberarán de buena parte del tiempo que a diario pasamos conduciendo y mejorarán la seguridad de nuestras carreteras y calles. Van a revolucionar las ciudades, pero aún falta por determinar de qué manera. Por un lado, cabe imaginar que cada vez habrá más personas que compartan estos automóviles, de modo que las máquinas podrán transportar a un pasajero tras otro durante todo el día. En este caso, nuestras ciudades funcionarían empleando tan solo una pequeña fracción de los vehículos actualmente en circulación. Por otro lado, quizá se produzcan situaciones más distópicas. Robin Chase, cofundadora y ex presidenta ejecutiva del servicio de automóviles compartidos Zipcar, ha escrito sobre «coches zombis (aquellos que no llevan a nadie en su interior) que obstruirán nuestras ciudades y carreteras». Su visión augura conductores profesionales en paro, una pérdida de los ingresos procedentes de las infraestructuras de transportes y «una pesadilla de contaminación, embotellamientos y malestar social».

¿Nirvana tecnológico o distopía urbana? Para abordar esta cuestión, hay que profundizar en dos aspectos: la manera en que los vehículos autónomos podrían alterar el paisaje urbano y la forma en que nos movemos por este.

LA ECONOMÍA DE LA COMPARTICIÓN

En promedio, los coches permanecen en reposo el 96 por ciento del tiempo, lo que los convierte en candidatos ideales para la economía de la compartición. La reducción de los atascos puede llegar a ser enorme. Un puñado de empresas que ofrecen servicios de coches compartidos, como Zipcar y car2go, ya está causando un gran impacto en el número total de vehículos que circulan por nuestras ciudades.

Las ventajas crecerán de forma exponencial a medida que los vehículos autónomos, que actualmente no pasan de ser modelos experimentales, ganen cuota de mercado y la distinción entre los medios de transporte público y los privados se difumine. «Su» coche podría dejarle en el trabajo por la mañana y, luego, en lugar de permanecer en un aparcamiento, llevar a algún otro miembro de su familia, vecindario o de su comunidad en las redes sociales.

Como resultado, un único vehículo podría alcanzar las 24 horas de uso al día en vez de solo una. Un artículo reciente de nuestros colegas del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) indica que, en tales condiciones, la demanda de movilidad de una ciudad como Singapur (anfitriona de una de las primeras flotas del mundo de coches autoconducidos accesibles al público) podría satisfacerse con solo el 30 por ciento de sus vehículos hoy existentes. Además de fomentar los coches de uso compartido, la conducción autónoma podría fomentar también los viajes compartidos. Aplicaciones como Via, uberPOOL y Lyft Line ya permiten que diferentes personas realicen juntas el mismo trayecto en el mismo vehículo, lo cual ayuda a reducir los costes de operación y las tarifas individuales. La conducción autónoma fomentaría aún más los viajes compartidos, ya que podrían gestionarse en línea.

Nueva York constituye un magnífico ejemplo de ciudad eminentemente compartible. El proyecto HubCab de nuestro laboratorio recopiló datos de 170 millones de trayectos realizados en 13.500 taxis con licencia municipal: en concreto, la duración de cada carrera y las coordenadas GPS de todos los puntos de recogida y de destino. A continuación desarrollamos un modelo matemático a fin de determinar el efecto potencial de que se compartiesen viajes. El proyecto introdujo el concepto de «redes de compartibilidad», que hace posible optimizar las oportunidades de compartir viaje. Nuestros resultados revelaron que compartir los taxis reduciría el número total de automóviles en un 40 por ciento y los retrasos que sufrirían los pasajeros solo serían mínimos. Otros estudios han mostrado que lugares como San Francisco, Viena y Singapur podrían beneficiarse en igual medida.

Si al hábito de compartir coches se le sumase el de compartir trayectos, una ciudad podría arreglárselas con el 20 por ciento de los vehículos que circulan hoy. Por supuesto, estas cifras son teóricas. En la vida real, dependerían de lo dispuesta que se mostrara la gente a viajar con otras personas y a adoptar la conducción autónoma. Pero cualquier descenso en el número de vehículos disminuiría los costes y la energía asociados a la construcción y mantenimiento de nuestra infraestructura de movilidad. Una menor cantidad de coches también se traduciría en tiempos de viaje más cortos, en una menor congestión del tráfico y en un menor impacto ambiental.

NI APARCAMIENTOS NI SEMÁFOROS

Los coches autónomos no requerirán infraestructura urbana adicional (calzadas especialmente diseñadas, por ejemplo), pero traerán consigo otros cambios importantes. Considérese el problema de aparcar. En EE.UU., las infraestructuras destinadas a aparcamiento cubren alrededor de 20.000 kilómetros cuadrados, una superficie parecida a la del estado de Nueva Jersey (la de las provincias españolas más grandes). Si se compartieran más vehículos se produciría un espectacular descenso en los espacios de estacionamiento necesarios. ¿Cuáles serían las consecuencias?

Con el tiempo, los extensos y valiosos terrenos de las ciudades que en la actualidad se encuentran ocupados por aparcamientos podrían reurbanizarse para dar cabida a un nuevo espectro de funciones sociales. El Día del Park(ing), acontecimiento anual que se celebró por primera vez en San Francisco en 2005, aporta algunas primeras ideas. Cada año, el evento desafía a artistas, diseñadores y ciudadanos a transformar los aparcamientos al aire libre en lugares públicos temporales. A una escala mucho mayor y de forma permanente, los aparcamientos desiertos podrían reconvertirse para ofrecer servicios públicos: parques infantiles, cafeterías, circuitos saludables, carriles bici.

Quizá desaparezca también otra vista común en las calles. Los semáforos tienen ya 150 años; fueron concebidos para evitar los choques entre carruajes de caballos. Los vehículos sin conductor, equipados con sensores y capaces de comunicarse entre sí para mantener la distancia de seguridad, no necesitarán ese tipo de ayuda en las intersecciones. Como resultado, los cruces basados en la asignación de franjas de tiempo (*slots*), que toman como modelo los sistemas de control de tráfico aéreo, podrían sustituir a los semáforos. Al aproximarse a

una intersección, un vehículo se pondría en contacto automáticamente con un sistema de gestión de tráfico, el cual le asignaría una franja de tiempo individual para cruzar la intersección.

Los cruces basados en asignaciones de ventanas temporales posibilitarían una reducción significativa de las colas y detenciones, como ha demostrado nuestro proyecto Light Traffic. Los análisis enseñan que los sistemas que estableciesen franjas en tiempo real permitirían que cruzara una intersección el doble de vehículos que cuando se utilizan semáforos. Esta propuesta tendría, además, un gran impacto en la red de calles de cualquier ciudad: acortaría los tiempos de viaje y de espera, disminuiría el consumo de combustible, y una menor congestión del tráfico se traduciría en una menor contaminación atmosférica. Como ventaja adicional, estos cruces inteligentes son lo bastante flexibles como para acomodar a los peatones y bicicletas que comparten la calzada con los coches.

Merece la pena señalar que tan atractiva visión no solo depende de que haya automóviles autónomos y sistemas inteligentes de gestión del tráfico. También requiere que el mercado se coordine mejor. Hoy en día, las empresas de coches de uso compartido disponen de plataformas independientes que no se comunican entre sí. Los clientes no pueden comparar las distintas opciones con facilidad, y los conductores no pueden beneficiarse de la demanda agregada. La situación recuerda a la de la industria aérea en las épocas anteriores a Internet. Los pasajeros pueden valorar ahora distintas alternativas para un vuelo gracias a varios sistemas de distribución globales que siguen los estándares de la Alianza OpenTravel y, por tanto, se benefician de una mayor transparencia y competencia.

En las ciudades podría construirse semejante arquitectura de movilidad mediante dos estrategias. La primera iría de abajo arriba: participantes menores empezarían a adoptar estándares. Esto ya está produciéndose: es el caso de la colaboración entre Lyft, Didi Chuxing en China, Ola en la India y GrabTaxi en el sudeste asiático. El segundo empeño se orientaría de arriba abajo y estaría liderado por un Gobierno o una organización global, como el Consorcio World Wide Web. Esto no parece demasiado improbable, puesto que los medios de transporte ya se encuentran fuertemente regulados en la mayoría de los países. Cualquiera de los dos enfoques serviría para crear una plataforma increíblemente potente y transparente de servicios de transporte y logística.

POSIBLES DIFICULTADES

La conducción autónoma y los viajes compartidos podrían originar cambios abrumadoramente positivos en el transporte urbano. Sin embargo, si la transición a la ciudad sin conductores no se lleva a cabo con cuidado, también podría acarrear consecuencias negativas.

La primera preocupación la constituye la seguridad. Todos sabemos lo que pasa cuando un virus bloquea un ordenador. Pero ¿qué ocurriría si un virus atacase un automóvil? Los programas informáticos maliciosos son difíciles de combatir con las herramientas tradicionales del Gobierno y de la industria, y resultan especialmente peligrosos en el caso de sistemas que, como los coches autónomos, combinan lo digital y lo físico.

Cabe la posibilidad de que surjan problemas añadidos debidos a lo que podría denominarse «injusta ventaja competitiva» de la conducción autónoma. El coste de recorrer un kilómetro podría desplomarse tan sustancialmente que la gente se decantaría por los vehículos autónomos en detrimento del transporte público. Pero esto, a su vez, podría hacer que aumentase el número de vehículos de una ciudad y se produjese una surrealista paralización del tráfico. Además, el hecho de mantener los coches en circulación a todas horas en lugar de estar aparcados el 96 por ciento del tiempo podría elevar los niveles de contaminación.

Los vehículos autónomos quizá produzcan otra consecuencia no intencionada: agravar la expansión urbana descontrolada. No sería la primera vez que una innovación tecnológica relacionada con la movilidad produce tal efecto. En el libro *Por las cuatro rutas*, de 1941, Le Corbusier describió lo ocurrido en las primeras décadas del siglo xx: «El ferrocarril convirtió las ciudades en verdaderos imanes; se llenaron y crecieron sin control, y progresivamente se abandonó el medio rural. Fue un desastre. Por suerte, el automóvil, mediante la organización de las carreteras, recompondrá esta armonía rota y comenzará la repoblación del campo». En el futuro, ¿qué sucedería si las personas, una vez que puedan desplazarse mientras duermen o trabajan, decidiesen mudarse fuera de las ciudades, consumiéndose así terreno y expandiéndose sin control una forma insostenible de poblamiento disperso?

Merece la pena mencionar un par más de riesgos. Las multas, las tarifas de aparcamiento y los impuestos asociados a los vehículos representan una sustancial fuente de ingresos para todo tipo de administraciones locales y nacionales. El uso generalizado de los vehículos autónomos podría cortar este importante flujo de dinero. Tal vez las ciudades podrían compensar las pérdidas reurbanizando los aparcamientos innecesarios y construyendo nuevas infraestructuras que generaran ingresos. Sin embargo, debemos recordar también que millones de conductores de todo el mundo que trabajan en el sector logístico o en el del transporte urbano correrían el riesgo de perder su empleo.

Como escribió Robin Chase, «limitarnos a quitar a los conductores de los coches mientras mantenemos el sistema igual en todo lo demás provocará un desastre». Por lo tanto, es fundamental que veamos estas nuevas tecnologías con ojo crítico y las orientemos hacia las metas sociales que deseamos. Una buena estrategia ayudaría a prevenir los efectos negativos que hemos descrito. Al igual que ocurrió en el siglo xx, mucho dependerá de un provechoso ciclo de prueba y error. IyC

PARA SABER MÁS

Waste energy. George Hill en *Scientific American*, 12 de mayo de 1894.
Trash-to-treasure: Turning nonrecycled waste into low-carbon fuel. Alex C. Breckel, John R. Fyffe y Michael E. Webber, en *EARTH*, vol. 57, n.º 8, págs. 42-47, agosto de 2012.
The upcycle: Beyond sustainability — Designing for abundance. William McDonough y Michael Braungart. North Point Press, 2013.
Más detalles sobre Park 20|20 en: **www.park2020.com/en**
Sitio web del Laboratorio Senseable City del Instituto Tecnológico de Massachusetts: **http://senseable.mit.edu**

EN NUESTRO ARCHIVO

La ciudad eficiente. Mark Fischetti en *IyC*, noviembre de 2011.
La verdad sobre los coches sin conductor. Steven E. Shladover en *IyC*, agosto de 2016.

FÍSICA

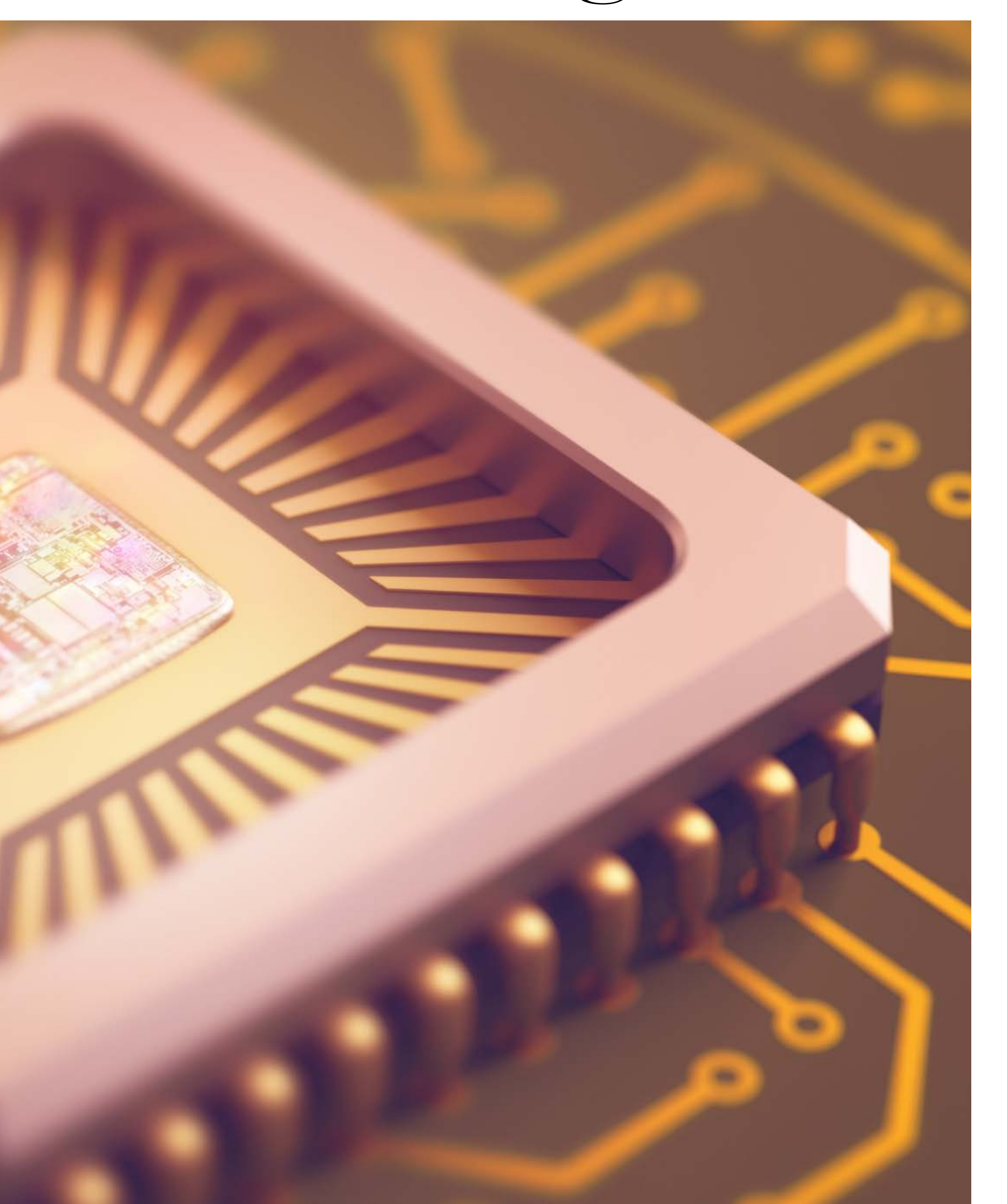
Hacia la computac



Un experimento ha demostrado la posibilidad de construir un dispositivo de cálculo que funcione con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña

Miquel López Suárez, Igor Neri y Luca Gammaitoni

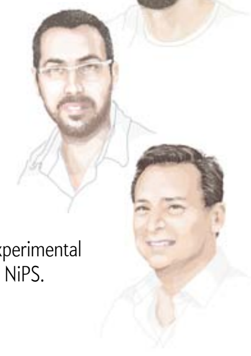
ión de energía cero



Miquel López Suárez es doctor en física e investigador posdoctoral en el Laboratorio de Ruido en Sistemas Físicos (NiPS), de la Universidad de Perugia.

Igor Neri es doctor en ingeniería de la información e investigador posdoctoral en el NiPS.

Luca Gammaitoni es profesor de física experimental en la Universidad de Perugia y director del NiPS.



¿Ha notado que la batería de su teléfono móvil cada vez dura menos? El fenómeno ha ido a la par que el aumento de las prestaciones de estos dispositivos. De simples terminales telefónicos han pasado a convertirse en verdaderos centros multimedia con funciones muy variadas: se conectan a Internet, toman fotografías y vídeos, sirven como reproductores de sonido e imágenes o incluso controlan nuestro estado de salud y nos ofrecen prestaciones deportivas.

Este espectacular aumento de funciones ha sido posible gracias al desarrollo tecnológico de las últimas décadas, el cual nos ha provisto de microprocesadores cada vez más complejos y veloces. Los microprocesadores constituyen el corazón de todo dispositivo electrónico. Contienen un enorme número de transistores (actualmente, más de mil millones por dispositivo), cada uno de los cuales usa una pequeña cantidad de energía. Hoy por hoy, los transistores más eficientes consumen unos 10^{-15} julios por operación, donde un julio equivale a la energía necesaria para elevar una manzana a un metro del suelo. Cuanto mayor sea el número de transistores, mayor será la capacidad de cálculo, pero también el consumo de los dispositivos. A ello se debe que las baterías duren cada vez menos.

Los diseñadores y fabricantes de microprocesadores se encuentran hoy ante la difícil tarea de aumentar la potencia de cálculo (lo que implica elevar el número y la velocidad de los transistores) sin incrementar en exceso el consumo de energía. La situación es grave hasta el punto de que, según el informe *Rebooting the IT revolution: A call to action*, presentado en 2015 por la Asociación Industrial de Semiconductores y la Corporación de Investigación en Semiconductores, si esta tendencia continuase, en 2040 la demanda de energía debida al uso de ordenadores superaría la producción mundial de electricidad.

En los últimos cuarenta años se han conseguido importantes logros con miras a reducir el consumo energético de los transistores. Sin embargo, parece que, por una serie de problemas tanto técnicos como económicos, esa senda no será transitable durante mucho más tiempo. Si deseamos evitar una paralización en el crecimiento del sector, tendremos que encontrar nuevos modos de construir ordenadores que resulten más eficientes desde el punto de vista energético.

¿Cómo alcanzar ese objetivo? ¿Hasta dónde podremos reducir el consumo energético de un microprocesador? ¿Imponen las leyes fundamentales de la física algún límite al consumo mínimo de un dispositivo de cálculo? ¿O cabe imaginar un ordenador que funcione con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña?

INFORMACIÓN FÍSICA

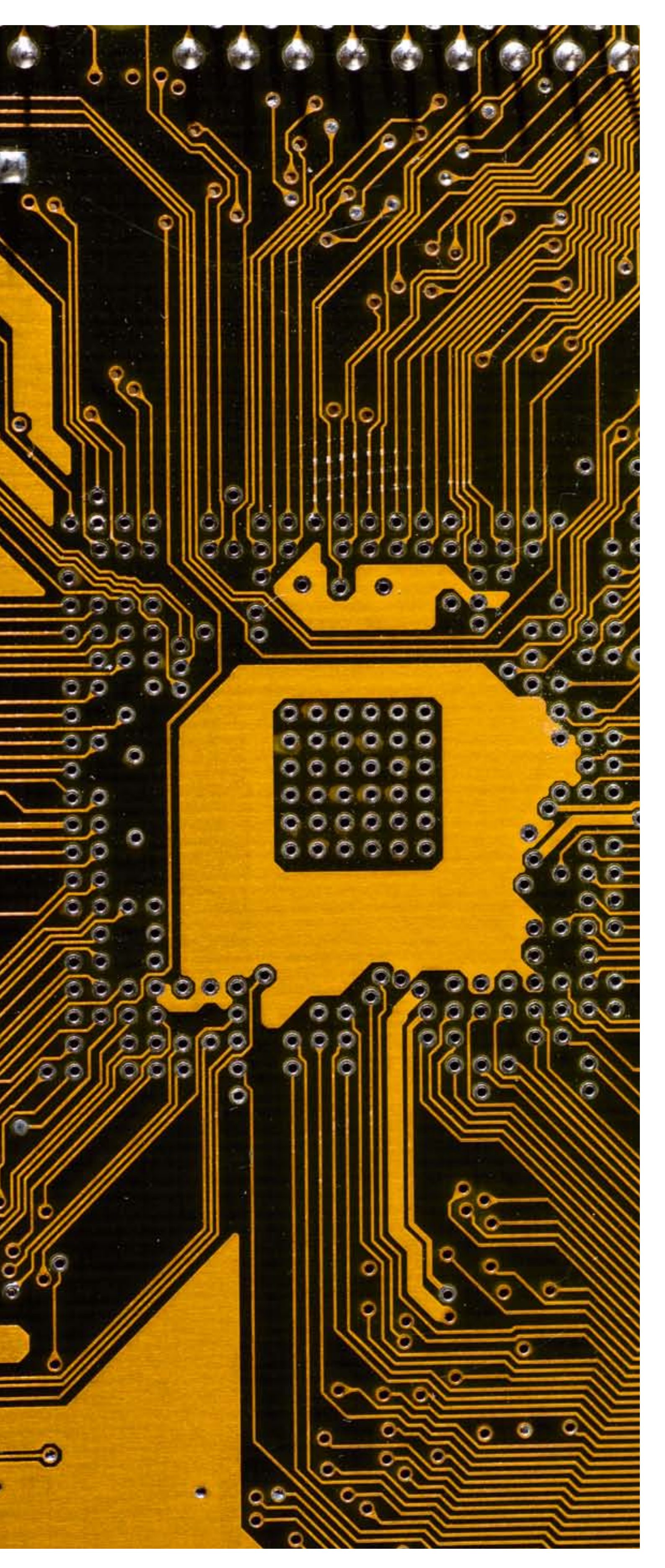
Los investigadores se han venido formulando tales preguntas desde los albores de las ciencias de la computación. Las primeras respuestas se deben a algunos de los pioneros de la informática, como Claude Shannon, John von Neuman y Rolf Landauer. A este último, físico de origen alemán que trabajó durante largo

EN SÍNTESIS

El desarrollo tecnológico de las últimas décadas nos ha permitido disponer de ordenadores cada vez más complejos y veloces. Sin embargo, ese aumento de potencia ha incrementado la energía necesaria para alimentar los dispositivos.

Un resultado de 1961, conocido como «principio de Landauer», establece que el funcionamiento de todo dispositivo lógico irreversible lleva asociado un consumo de energía que no puede ser inferior a cierta cantidad límite.

Un experimento reciente ha demostrado que dicho principio es falso. Aunque los prototipos usados no pueden sustituir a los microprocesadores actuales, el resultado abre la puerta a la fabricación de ordenadores mucho más eficientes.



tiempo en IBM, se le atribuye un importante resultado que hoy conocemos como «principio de Landauer».

Para entender en qué consiste, debemos recordar que todo ordenador es, en última instancia, un sistema físico que, como tal, ha de obedecer las leyes de la termodinámica. En un artículo hoy célebre publicado en 1961 en la revista *IBM Journal of Research and Development*, Landauer señaló que la aplicación de estas leyes al funcionamiento de las computadoras impone límites a la energía que un ordenador debe utilizar durante su funcionamiento. En particular, el segundo principio de la termodinámica implica que, en toda transformación que conlleve una disminución de entropía (es decir, una reducción del número de estados físicos posibles), se debe consumir una cierta cantidad de energía. Por tanto, dicho proceso no puede llevarse a cabo a expensas de un gasto energético nulo.

¿Cuándo tiene lugar una transformación caracterizada por una disminución de entropía? Para entender bien este punto, consideremos una operación que los ordenadores deben realizar a menudo: la escritura de una posición de memoria. En una computadora, los datos se representan mediante secuencias de ceros y unos, o bits, acrónimo de las palabras *binary* y *digit*, es decir, dígito binario. Para efectuar cálculos en un ordenador necesitamos por tanto dispositivos que puedan adoptar dos estados, como «encendido» y «apagado» o «abierto» y «cerrado». Tales mecanismos reciben el nombre de interruptores binarios, y pueden clasificarse en dos grandes grupos: combinacionales, útiles para efectuar los cálculos propiamente dichos; y secuenciales, útiles para las memorias.

Un dispositivo combinacional es un interruptor binario que puede cambiar su estado cuando se le aplica una entrada y que, una vez retirada esta, regresa a su estado inicial. A modo de ejemplo, pensemos en una bola que descansa sobre un plano y que se encuentra unida a un muelle. Si aplicamos una fuerza (la entrada de nuestro dispositivo), el muelle se estirará y la bola cambiará de posición (la salida de nuestro dispositivo). Cuando deje de aplicarse la fuerza, la bola, gracias a la presencia del muelle, regresará a la posición inicial.

Un dispositivo secuencial resulta similar al anterior, pero con la diferencia de que, cuando se retira la entrada, no regresa a su estado inicial; de ahí que resulte útil para las memorias. A modo de ejemplo, podemos imaginar que nuestra bola se encuentra en una huevera con dos alojamientos. Si aplicamos una fuerza, podemos hacer que la bola cambie de posición. Pero, una vez que dejemos de aplicarla, la bola permanecerá allí donde se encuentre.

Para almacenar en una memoria un bit de información debemos usar un dispositivo secuencial y generar una transformación de su estado físico. En la práctica, esto se efectúa asociando un estado lógico (un valor del bit) a cada uno de los dos estados físicos posibles: por ejemplo, 0 al interruptor abierto y 1 al cerrado. Un dispositivo secuencial abandonado a sí mismo alcanzará un estado de equilibrio termodinámico; es decir, uno en el que puede encontrarse con igual probabilidad en el estado 0 o el 1. Si, por ejemplo, deseamos almacenar en una memoria un bit en el estado 0, habremos de aplicar una fuerza que rompa ese estado de equilibrio y que, con toda certeza, lo lleve al estado lógico 0.

La relación entre la entropía y el número de estados físicos posibles de un sistema fue deducida a finales del siglo XIX por el físico austríaco Ludwig Boltzmann. Según dicha relación, la escritura de un estado de memoria como la que acabamos de describir constituye una transformación física que comporta

Dispositivos reversibles e irreversibles

Los microprocesadores llevan a cabo los cálculos mediante puertas lógicas: dispositivos que asocian una cierta salida a cada combinación de bits de entrada. Por ejemplo, una puerta OR (que implementa una disyunción lógica, «*A* o *B*») admite dos entradas y una salida: si ambas entradas son 0, la salida es también 0; en todos los demás casos, la salida es 1 (*tabla*).

Las puertas lógicas pueden clasificarse en reversibles e irreversibles, un concepto introducido en 1961 por el físico Rolf Landauer. Según este, un dispositivo es lógicamente irreversible si su salida no basta para identificar de manera unívoca las entradas. En el caso de la puerta OR, solo si la salida es 0 podremos concluir que la entrada fue la combinación 00. Sin embargo, si la salida es 1, no podremos afirmar con certeza si las entradas fueron 00, 10 o 11.

Poco después del trabajo de Landauer, el teórico de la computación Charles Bennet demostró la posibilidad de efectuar cálculos usando puertas lógicas reversibles, como las ideadas en 1980 por Tommaso Toffoli y en 1983 por Edward Fredkin, por entonces ambos en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Tales puertas se caracterizan por tener un número de salidas no inferior al de entradas, lo que permite recuperar el valor de las segundas a partir del de las primeras.

Entrada		Salida
A	*B*	*A* OR *B*
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

una disminución de entropía, ya que el sistema pasa de estar caracterizado por dos estados posibles a estarlo por uno solo. Ahora bien, por el segundo principio de la termodinámica, a esa disminución de entropía le corresponde un gasto energético mínimo. En nuestro caso, y a temperatura ambiente, el valor de dicho gasto resulta minúsculo: del orden de 10^{-21} julios, una milésima de milmillonésima de milmillonésima de julio.

Landauer llevó a cabo su análisis energético de los procesos de cómputo a principios de los años sesenta. En aquella época ya se había popularizado el concepto de cantidad de información, introducido quince años antes por Claude Shannon, ingeniero de los Laboratorios Bell. Siguiendo esta idea, una posición de memoria que no esté escrita (es decir, en equilibrio termodinámico) constituye un dispositivo caracterizado por dos estados, ya que puede encontrarse tanto en el estado lógico 0 como en el 1. Si escribimos nuestra memoria y la obligamos a adoptar el estado 0, por ejemplo, el número de estados en los que puede encontrarse pasará de dos a uno. Como ya hemos visto, a esta operación lógica, hoy conocida como «borrado de Landauer», le corresponde una transformación física que conduce a una disminución de la entropía y, por ende, a un gasto de energía que no puede ser inferior a cierta cantidad límite.

A partir de tales consideraciones, Landauer extrajo la idea fundamental que subyace al principio que lleva su nombre: cada vez que reducimos la cantidad de información en un dispositivo, ello equivale a efectuar la correspondiente disminución de entropía y, por tanto, requiere un gasto de energía que no puede ser nulo. Es en este sentido como debe interpretarse la célebre conclusión de Landauer: «La información es física».

PROCESOS REVERSIBLES E IRREVERSIBLES

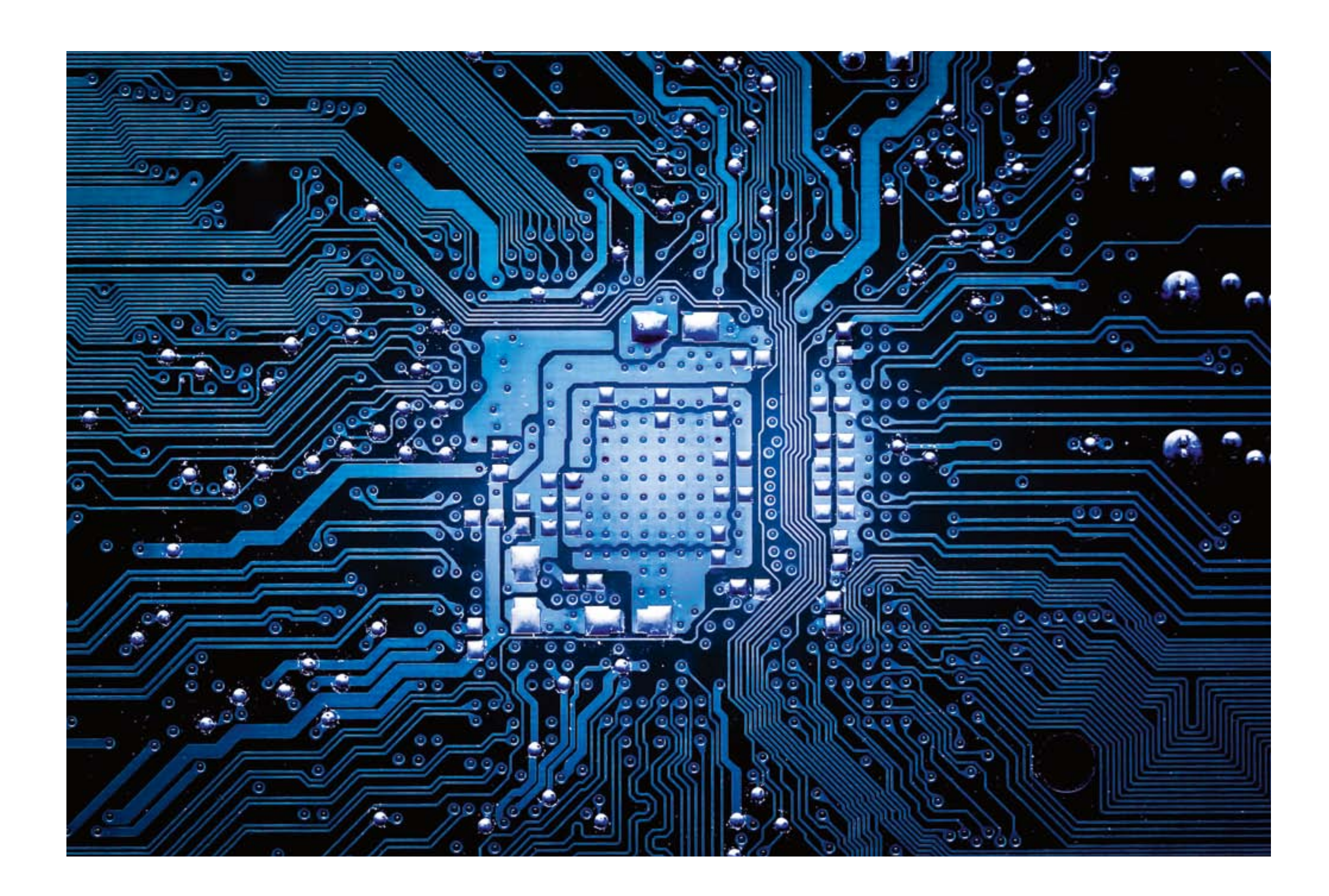
La idea de asignar un papel físico a la cantidad de información, una magnitud considerada hasta entonces puramente matemática, se popularizó en los años sesenta y setenta del pasado siglo y generó variopintas interpretaciones, no todas plenamente compartidas por la comunidad científica. Una de las cuestiones más controvertidas se refiere a cuál es esa cantidad mínima de energía requerida para realizar un cálculo. Para responder a esta pregunta, hemos de definir con precisión qué entendemos por «efectuar un cálculo».

Como hemos mencionado, un ordenador necesita dos tipos de dispositivos: secuenciales y combinacionales. Los primeros se emplean en las memorias; los segundos, para las operaciones de cálculo. Estas últimas, que habitualmente identificamos como las cuatro operaciones aritméticas básicas (suma, resta, multiplicación y división), pueden llevarse a cabo combinando puertas lógicas. Un ejemplo sencillo lo hallamos en la puerta lógica OR, o de disyunción lógica. Decimos que esta puerta es «lógicamente irreversible», un concepto introducido por el propio Landauer en su famoso artículo de 1961: «Diremos que un dispositivo es lógicamente irreversible si su salida no basta para identificar de manera unívoca las entradas». La idea de Landauer sobre el consumo energético del cálculo resulta muy simple y quedó expresada en un artículo publicado en esta revista en 1985: «Siempre que utilicemos una de tales puertas lógicamente irreversibles disiparemos energía en el ambiente» [*véase* «Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo», por Charles Bennet y Rolf Landauer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1985].

En un principio, Landauer pensó que para efectuar cálculos resultaba indispensable usar puertas lógicas irreversibles. Poco después, sin embargo su colega de IBM Charles Bennet demostró la posibilidad de realizar cálculos usando otro tipo de puertas lógicas, denominadas reversibles. En estas, una vez conocido el estado lógico de salida, es posible recuperar el estado lógico de todas las entradas.

Por tanto, la idea de Landauer, compartida también por Bennet, puede resumirse así: dada cualquier puerta lógica, su funcionamiento estará unido a cierto gasto energético, el cual vendrá dado por la disminución en la cantidad de información que contiene la salida con respecto a las entradas. En este sentido, Landauer trata las puertas lógicas como había hecho con las memorias: toda disminución de información conlleva un gasto mínimo de energía.

En las puertas lógicas reversibles de interés práctico, el número de salidas es igual al número de entradas, por lo que esa



pérdida de información no existe y pueden hacerse funcionar sin consumo energético. Claramente, este no es el caso de puertas lógicas como OR, que, con dos entradas y una salida, entraña la pérdida de un bit de información. Para Landauer, una puerta OR no puede operarse sin consumir una cantidad de energía inferior a cierto valor límite. Dicho umbral se conoce hoy como «límite de Landauer».

En resumen, podemos afirmar que el trabajo de Landauer y Bennet difundió la idea de que es posible realizar un cálculo sin consumir energía, siempre y cuando usemos solo puertas lógicas reversibles. Esta noción dio lugar al nacimiento de una disciplina conocida como «cálculo reversible». Hasta ahora, sin embargo, este campo ha dado lugar a pocas aplicaciones. Ello obedece a dos razones. Por un lado, no existen muchos ejemplos prácticos de puertas lógicas reversibles. Por otro, debido a diversos fenómenos de disipación y resistencias internas, el consumo energético de las puertas actuales resulta millones de veces mayor que el supuesto límite de Landauer, por lo que, en la práctica, emplear puertas reversibles no modificaría la cantidad de energía requerida. No obstante, aunque por ahora la diferencia no resulte significativa desde el punto de vista tecnológico, desde una perspectiva teórica sí supone un salto conceptual.

Según el límite de Landauer, la cantidad mínima de energía que debe invertirse para hacer funcionar una puerta lógica irreversible resulta tan minúscula que, hasta hace poco, no disponíamos de las técnicas adecuadas para medirla. Como consecuencia, la teoría de Landauer permaneció durante largo tiempo sin confirmación experimental. En 2012, sin embargo, Eric Lutz, por entonces en la Universidad de Augsburgo, Sergio Ciliberto, de la Universidad de Lyon, y otros investigadores pusieron a prueba la operación de borrado de Landauer usando una pequeña esfera en suspensión en un líquido y sometida a una pinza óptica. Los resultados, publicados en *Nature*, se mostraron en consonancia con la previsión de Landauer. Dos años después, John Bechhoefer y sus colaboradores de la Universidad Simon Fraser, en Canadá, repitieron el experimento y confirmaron el resultado en *Physical Review Letters*. Sin embargo, y a pesar de que en estos años se han llevado a cabo otros trabajos relacionados con la teoría de Landauer, hasta ahora nadie había sometido a una prueba directa la afirmación según la cual no es posible hacer funcionar un dispositivo lógicamente irreversible con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.

EL LÍMITE A PRUEBA

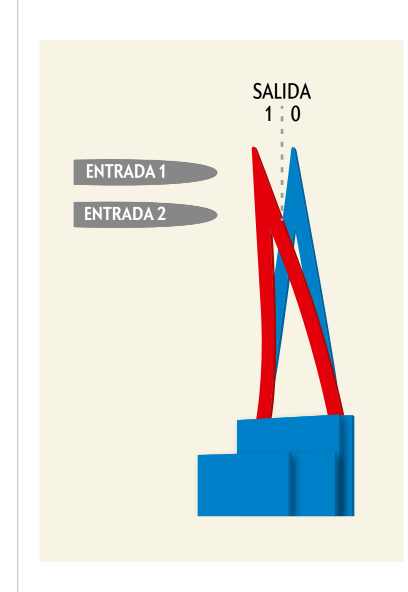
Hace unos cinco años, los autores de este artículo y otros investigadores propusimos a la Comisión Europea la financiación de un proyecto de investigación encaminado a estudiar los aspectos del cálculo a «energía cero». El proyecto, denominado LANDAUER e iniciado en septiembre de 2012, ha conocido la participación de seis grupos europeos coordinados por la Universidad de Perugia. Tras unos años de trabajo, hemos obtenido varios resultados notables publicados en revistas internacionales. Uno de los más interesantes hace referencia, precisamente, a la aplicación del principio de Landauer a puertas lógicas irreversibles.

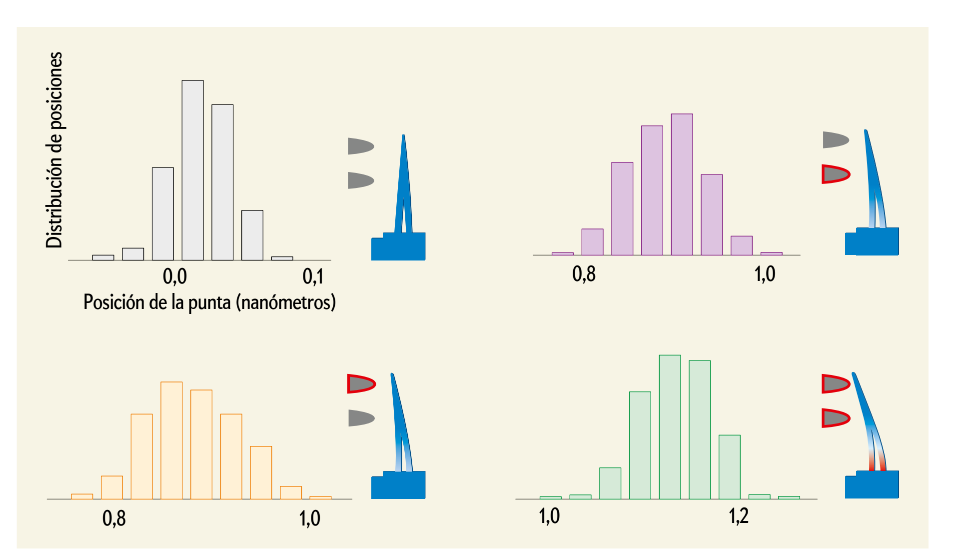
En el Laboratorio de Ruido en Sistemas Físicos (NiPS), de la Universidad de Perugia, construimos una puerta lógica OR haciendo uso de la tecnología microelectromecánica (*véase el recuadro* «Landauer, puesto a prueba»). Nuestra puerta, con-

Landauer, puesto a prueba

El «principio de Landauer» establece que la operación de todo dispositivo lógicamente irreversible disipará al entorno una cantidad mínima de energía. Dicha cota viene dada por $k_B T \ln 2$, donde k_B denota la constate de Boltzmann (una constante universal de la naturaleza) y T la temperatura. Con el objetivo de poner a prueba esta idea, los autores construyeron un dispositivo microelectromecánico que imitaba las funciones de una puerta lógica OR.

Dicho dispositivo constaba de una lámina de nitruro de silicio con forma de V invertida y unas dimensiones de unos 200 micrómetros de longitud y 500 nanómetros de anchura (*abajo, izquierda*). La lámina podía doblarse por medio de una fuerza electrostática ejercida por dos puntas metálicas vecinas a las que se aplicaba una diferencia de potencial. Si no se aplicaba tensión a ninguna de las puntas (equivalente a la entrada 00), la lámina permanecía en posición vertical (asociada al estado





sistente en una pequeña lámina sometida a fuerzas electrostáticas, constituye un ejemplo de dispositivo irreversible: si nos remitimos a la combinación de entradas 01, 10 y 11, veremos que, de la mera observación de la salida (1), representada por la posición de la lámina, resulta imposible deducir la configuración de entrada.

A fin de verificar la aplicación del límite de Landauer a nuestras puertas lógicas, llevamos a cabo un gran número de mediciones relativas a la cantidad de trabajo ejercido por las fuerzas eléctricas para doblar la lámina, bajo diversas condiciones del valor de las entradas y también a distintas velocidades de transformación. Como resultado, hallamos que casi todas las medidas mostraban que la energía empleada era inferior al límite propuesto por Landauer. Nuestros resultados, publicados el año pasado en *Nature Communications*, indican que, al contrario de lo que sostiene la teoría de Landauer, sí es posible hacer funcionar puertas lógicas irreversibles consumiendo una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.

UNA CUESTIÓN DE LENGUAJE

Aún es pronto para saber cómo recibirá la comunidad científica nuestro resultado. No obstante, hemos de recordar que, desde sus inicios, la teoría de Landauer ha sido objeto de controversia. Aclamada por ingenieros electrónicos y de la información, a menudo ha tropezado con la oposición de los expertos en física estadística. En nuestra opinión, ello se debe en gran medida a malentendidos derivados del uso de diferentes lenguajes. Landauer asume un lenguaje propio de la teoría de la información, que, sin embargo, se adapta mal a la física. Habla de «entrada» y «salida» de un dispositivo de cálculo y asocia a estas «dos partes del sistema» una cierta cantidad de información.

Ahora bien, si examinamos con atención un dispositivo de cálculo, nos daremos cuenta de que el papel de las entradas puede asignarse a las fuerzas que actúan *sobre* el sistema, mientras que el de la salida queda representado por el estado *del* sistema. En este sentido, las entradas corresponden simplemente a la causa de la variación del estado, pero no cuentan a la hora de calcular el cambio en la entropía, puesto que no forman parte del sistema físico que experimenta la transformación.

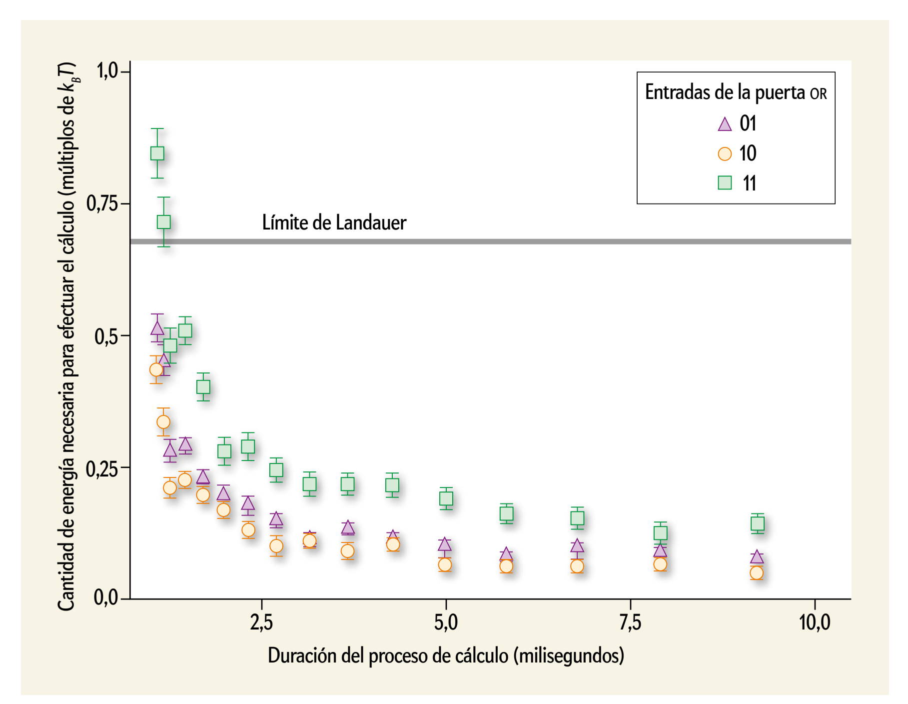
Desde el punto de vista de Landauer, lo importante es la diferencia en la cantidad de información entre la entrada y la salida, lo que se interpreta como un cambio en la entropía del sistema. El punto de vista termodinámico, en cambio, razona sobre las transformaciones que experimenta un sistema desde un estado inicial hasta otro final. Para la termodinámica solo cuenta la variación de entropía entre esos dos estados o, mejor dicho, la variación de entropía cuando el estado del sistema cambia en el tiempo bajo la acción de una fuerza. Por tanto, si logramos transformar el estado de forma que la entropía permanezca constante, las leyes de la física sí permiten que dicho cambio se produzca a expensas de un gasto energético nulo con independencia de cuántos bits estén presentes en la

DANILO SOSSI, SEGÚN EL AUTOR

de salida 0, *azul*). En cambio, al aplicar un voltaje a una o ambas puntas (estados de entrada 01, 10 o 11), la lámina se doblaba (estado de salida 1, *rojo*). Al interpretar de esta manera los valores de las entradas y las salidas, puede comprobarse que dicho dispositivo efectúa las funciones de la puerta lógica irreversible OR.

Debido al pequeño tamaño de la lámina, el desplazamiento de la punta resulta también minúsculo, por lo que se halla sujeto a fluctuaciones térmicas y se distribuye estadísticamente según la ley de Gauss (*página opuesta, derecha*). En el caso de las entradas 01 y 10, el desplazamiento medio resulta similar, con un valor ligeramente inferior a un nanómetro. Por su parte, el correspondiente a la entrada 11 se sitúa en torno a 1,1 nanómetros.

La gráfica reproducida aquí muestra tres curvas relativas a las medidas de la energía disipada en el proceso para tres configuraciones de entradas. Para cada una se observa que, al alargar la duración del ciclo, la energía disipada disminuye. Dicha pérdida energética se encuentra asociada a los procesos de rozamiento en el movimiento de la lámina. Cuanto más lento es el proceso, más se reduce la disipación de energía y más se acerca este a una transformación «adiabática»; es decir, a una en la que no hay intercambio neto de calor con el medio. La mayor parte de las medidas muestran un valor de la energía inferior al límite predicho por Landauer. Los resultados demuestran la posibilidad de construir dispositivos lógicos irreversibles que operen con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.



entrada; es decir, sin importar cuántas fuerzas actúen sobre el sistema.

Si el resultado de nuestro trabajo se ve confirmado por otros experimentos, será necesario revisar en profundidad la física de los procesos de cómputo. Y la teoría de Landauer, como tantas otras a lo largo de la historia, deberá actualizarse a la luz de las nuevas pruebas experimentales.

REGRESO AL PASADO

La inexistencia de una cota inferior en la energía necesaria para hacer funcionar una puerta lógica irreversible abre el camino a la fabricación de microprocesadores que no se vean limitados por una disipación mínima de calor. A fin de demostrar esta posibilidad, en nuestro laboratorio hemos construido también una puerta universal NOR (la negación de OR), cuyas combinaciones permiten efectuar todas las operaciones lógicas y aritméticas típicas de un microprocesador. El siguiente paso consistirá en construir un «sumador completo»; es decir, un dispositivo capaz de calcular la suma de números binarios. Por ahora ya hemos diseñado la configuración de láminas necesaria para fabricarlo, así como para medir el consumo energético durante su funcionamiento.

Somos conscientes de que nuestros prototipos microelectromecánicos no pueden constituir per se una alternativa a los circuitos semiconductores actuales: por más que resulten millones de veces más eficientes en cuanto a consumo energético, son demasiado lentos y voluminosos. Sin embargo, señalan un camino que podría llevar a los ordenadores de mañana a abandonar la tecnología microelectrónica de los transistores contemporáneos en favor de dispositivos nanomecánicos. Una especie de vuelta al pasado, cuando las calculadoras funcionaban con engranajes accionados por una manivela. El futuro de los sistemas de computación se antoja impredecible e interesante: todos estamos llamados a imaginar nuevos teléfonos con baterías de duración potencialmente ilimitada. IyC

PARA SABER MÁS

Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics. Antoine Bérut et al. en *Nature*, vol. 483, págs. 187-189, marzo de 2012.

Exploring the thermodynamic limits of computation in integrated systems: Magnetic memory, nanomagnetic logic, and the Landauer limit. Brian Lambson, David Carlton y Jeffrey Bokor en *Physical Review Letters*, vol. 107, art. 010604, julio de 2011.

Sub-k_BT micro-electromechanical irreversible logic gates. Miquel López-Suárez, Igor Neri y Luca Gammaitoni en *Nature Communications*, vol. 7, art. 12068, junio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo. Charles H. Bennet y Rolf Landauer en *IyC*, septiembre de 1985.

Rolf Landauer: A lomos de los electrones. Gary Stix en *IyC*, noviembre de 1998.



SECRET
NOFORN
BIOLOGICAL WARFARE
[redacted]
USSR: Biological Warfare (BW) Accident i
(S NF)
Recent intelligence strengthens alle
n accident at a BW installation caused
ies in southern Sverdlovsk during April
A recent [redacted] report is consistent
ors and supporting data about an accid
llation in Sverdlovsk. [redacted]
claimed that an explosion in a lab
han 200
sistent wi
spected of B
otographic evi
nd the measures take
gencies were officially
rax in Sverdlovsk. An an
ax epidemic in a public hea
have been designed to prevent
Sverdlovsk's million-plus pop
f the epidemic and the causati
cture.
[redacted] supported previous report
cteria allegedly escaped int
dustrial and residential ar
e military immediately imp
tion procedures, but the s
r control until late May
hat Defense Minister D. U
B. Petrovskiy came to Sve
e situation.
ved for Release
6-10-96
1
SECRET
8



SEGURIDAD

LA NUEVA AMENAZA DEL CARBUNCO

Recientes descubrimientos sobre un antiguo accidente demuestran lo mortíferas que pueden ser las armas biológicas

Paul S. Keim, David H. Walker y Raymond A. Zilinskas

El 2 de abril de 1979, sin que nadie lo advirtiera, un misterioso polvo se esparció por el aire desde una chimenea que se elevaba 25 metros por encima de un campo militar soviético a unos 1400 kilómetros al este de Moscú. Durante las siguientes semanas, por lo menos 80 residentes de la cercana ciudad de Sverdlovsk (hoy denominada Ekaterimburgo), en el centro de Asia, enfermaron de lo que al principio parecía ser una gripe. Sin embargo, después de unos días sufrieron una hemorragia interna grave, entre otras afecciones, y murieron 68, o más, de ellos.

Algunas personas de la base, conocida como Cuartel 19, sabían lo que había sucedido: la falta de filtros de aire había permitido la liberación de una cantidad desconocida de esporas bacterianas de una instalación militar secreta de investigación y producción, situada en el recinto. Las esporas provenían de una cepa de *Bacillus anthracis*, una bacteria que causa la enfermedad del carbunco (a menudo denominada, indebidamente, «ántrax») y que vive de manera natural en numerosas regiones del mundo. Pero esas esporas habían sido pulverizadas hasta un tamaño que les permitió ser inhaladas fácilmente hacia los pulmones

de animales y personas, donde causaron los principales daños y, como consecuencia, la mayoría de las muertes.

Una vez en el organismo, las esporas germinaron y adoptaron su aspecto original en forma de bacilo. Luego comenzaron a multiplicarse, se esparcieron hacia el torrente circulatorio y atacaron a varios tejidos. De hecho, el carbunco pulmonar suele matar en cuestión de días, a menos que los pacientes sean tratados enseguida con los antibióticos adecuados. Sin embargo, los militares soviéticos no revelaron a nadie la naturaleza del brote, ni siquiera a las autoridades sanitarias locales, que podrían haber salvado más vidas si hubieran sabido a qué se enfrentaban.

A pesar de los arduos intentos de la KGB por mantener en secreto lo ocurrido, las noticias del accidente se filtraron al mundo en otoño de 1979 y dejaron atónitos, entre otros, a los analistas de inteligencia occidentales. Se les había pasado por alto que la Unión Soviética estuviera fabricando material para armas biológicas, una acción que suponía la violación de un tratado que prohibía su desarrollo, producción, almacenamiento o uso. En 1972, más de cien países, entre ellos la Unión Soviética y Estados Unidos, habían firmado ese tratado, comúnmente conocido como la Convención sobre Armas Biológicas. Aun así, EE.UU. renunció a presentar una queja formal contra la URSS, según lo dispuesto en los términos del acuerdo.

Debido a que en los años setenta la revolución de la ingeniería genética ya había comenzado en otros países, los analistas de inteligencia occidentales conjeturaron entonces que los soviéticos podrían haber modificado *B. anthracis* en Sverdlovsk para que fuese más mortífera. Tuvieron que pasar 37 años para refutar esa suposición equivocada. En realidad, las únicas mejoras habían consistido en incorporar algunos compuestos y realizar otros ajustes para que las esporas se propagasen más fácilmente.

La Unión Soviética, por su parte, admitió al final que varias personas habían muerto de carbunco en Sverdlovsk y sus alrededores, pero negó que hubiera ocurrido algo inusual. La verdadera causa de la tragedia, según ellos, era el carbunco gastrointestinal causado por la matanza y el consumo de animales infectados con esporas naturales, afirmación que más adelante fue rechazada después de que expertos internacionales examinasen muestras de autopsias conservadas por patólogos locales.

Por último, en 1992, el entonces presidente ruso, Boris Yeltsin, admitió que la antigua Unión Soviética había construido y mantenido un gran programa para investigar y fabricar agentes para armas biológicas. Aunque afirmó que había ordenado el cierre inmediato del programa, el material desclasificado ha dejado en claro que el Ejército ruso simplemente ocultó a las autoridades civiles lo que quedaba del esfuerzo. En cualquier caso, la política oficial cambió de nuevo después de que Vladimir Putin fuera nombrado presidente en 1999. La nueva dirección sostuvo que ni la Unión Soviética ni el posterior Gobierno ruso habían emprendido jamás un programa de armas biológicas ofensivas. Cualquier tipo de investigación que se hubiera llevado a cabo había sido solo con propósitos defensivos, una actividad que estaba permitida por el tratado de armas biológicas.

Paul Kein es director ejecutivo del Instituto de Patógenos y Microbioma de la Universidad del Norte de Arizona en Flagstaff.

David H. Walker es director ejecutivo del Centro de Biodefensa y Enfermedades Infecciosas Emergentes de la División de Medicina de la Universidad de Texas en Galveston.

Raymond A. Zilinskas dirige el Programa de No Proliferación de Armas Químicas y Biológicas del Instituto Middlebury de Estudios Internacionales de Monterrey, en California.

Hoy en día, cuando una Rusia recién resurgida afirma su poder en la escena global, las lecciones de aquel incidente son cada vez más importantes para apreciar y entender la cuestión. Investigaciones adicionales que nosotros y otros hemos realizado en las últimas décadas han demostrado que a un país (o una organización terrorista) con un mínimo de capacidad bioindustrial no le es muy difícil construir u ocultar un programa de armas biológicas. No obstante, EE.UU., que a comienzos de los años setenta desmanteló su propio programa de armas biológicas, sigue demorándose en comprobar que otros hayan hecho lo mismo.

ESPORAS LETALES

En condiciones naturales, el carbunco había aquejado históricamente a los pastores, los clasificadores de lana y los curtidores. Pero poco después de que en el siglo XIX se descubriera la bacteria que causa la enfermedad, los estrategas militares se dieron cuenta de que podían emplearla para crear armas nuevas increíblemente mortales.

A finales del siglo XIX, Robert Koch (a menudo considerado padre de la bacteriología), basándose en experimentos realizados en el laboratorio de su casa, fue el primero en demostrar que un germen en particular (*B. anthracis*) causaba una determinada enfermedad (el carbunco). Unos años más tarde, Louis Pasteur (el padre de la teoría microbiana de las enfermedades infecciosas) desarrolló una vacuna para dicha enfermedad.

Koch demostró que las bacterias adoptan formas de bastoncillos alargados cuando se hallan en un ambiente propicio para crecer, como el interior del cuerpo de un animal, húmedo y rico en nutrientes. Sin embargo, en condiciones de sequedad, crean unas esporas duras, casi indestructibles, que pueden permanecer inactivas durante mucho tiempo. Cuando Koch inyectó esas esporas en ratones sanos, volvieron a convertirse en bacilos que desencadenaron la enfermedad y mataron a los animales.

El reconocimiento y el tratamiento tempranos del carbunco son fundamentales para la supervivencia. La mortalidad en infecciones no tratadas depende del punto de entrada de los microorganismos en el cuerpo: la inhalación de tan solo unas pocas esporas en los pulmones puede ser letal; la mortalidad

EN SÍNTESIS

Varias decenas de personas fallecieron de carbunco en una ciudad del Asia Central en 1979. Se tardó en saber que el brote se debió a un accidente en unas instalaciones secretas del Gobierno soviético para la producción de armas biológicas.

La bacteria que causa el carbunco, *Bacillus anthracis*, es especialmente adecuada para la obtención de armas no convencionales. Algunas partes del programa de la antigua Unión Soviética fueron desmanteladas de manera verificable en los años noventa.

Revelaciones recientes despiertan de nuevo preocupación por la posibilidad de que el Gobierno ruso esté relanzando su programa de armas biológicas, lo cual sería una violación de un tratado internacional firmado en 1972.

PÁGINAS ANTERIORES: TAYLOR CALLERY

por infecciones cutáneas asciende al 10 por ciento; en el caso de carbunco gastrointestinal, la cifra es desconocida, pero se cree que oscila entre el 25 y el 60 por ciento.

Las ventajas que conlleva su empleo en la guerra no convencional son obvias. Las esporas que causan el carbunco sobreviven durante años, lo que permite su producción a escala industrial y el almacenamiento del material mucho antes de que se utilice contra los soldados en el campo de batalla. Además, los suelos sembrados con esporas estarán contaminados durante décadas, lo que dificulta seriamente la capacidad del enemigo para criar ganado vacuno, ovejas u otros animales en los campos afectados.

El carbunco pulmonar ofrece la ventaja añadida, para cualquiera que quiera sembrar el terror, de su difícil diagnóstico al principio. Los signos iniciales suelen ser leves, con fiebre, cansancio y dolores musculares que recuerdan a la gripe o a la neumonía. Varios días después los pacientes sufren dificultad respiratoria, sus labios se vuelven azules y empieza a acumularse líquido en el tórax, momento en el que la muerte es generalmente inevitable. Las autopsias revelan hemorragia interna en los ganglios linfáticos adyacentes a los pulmones y en los tejidos que rodean el cerebro.

EL ACCIDENTE

Nunca se ha permitido entrar a ningún extranjero en el Cuartel 19, y menos aún en el Instituto de Investigación Científica de Microbiología ubicado en su interior, donde ocurrió el accidente. Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas, y especialmente después de la disolución de la Unión Soviética en 1991, nosotros y otros hemos reconstruido una cronología de lo ocurrido. Para ello, entrevistamos a numerosos científicos, médicos y técnicos que trabajaban en la ciudad de Sverdlovsk o que eran compañeros de trabajo de otros que estuvieron en el instituto. Muchos de los hechos que siguen han sido publicados previamente, por nosotros y también por desertores soviéticos.

Basándonos en esa información, creemos que el plan soviético de armas biológicas comenzó en 1928. En su apogeo, a finales de los ochenta, empleaba a unas 60.000 personas. *Bacillus anthracis* se convirtió pronto en uno de los patógenos más importantes del programa. Se descubrió que podría ser fácilmente convertido en un arma, lo que significaba que podría producirse de una manera estable y ello permitiría una gran dispersión.

Cuando, en 1949, se instauró un laboratorio militar en los terrenos de una antigua escuela de infantería cerca de Sverdlovsk, este se hallaba en las afueras de la ciudad. Sin embargo, quince años más tarde la ciudad había crecido y se extendía alrededor de las instalaciones secretas. A pesar de la proximidad de la población, en los años sesenta el Ministerio de Defensa decidió modernizar el establecimiento para que produjera las toneladas de esporas de *B. anthracis* necesarias para alimentar un potente programa de armas biológicas. (Ahora sabemos que en Arkansas, en EE.UU., a mediados de los cincuenta se crearon instalaciones de producción semejantes, más tarde desmanteladas.)

Los soviéticos equiparon un edificio de cuatro pisos de Sverdlovsk con tanques de fermentación para cultivar *B. anthracis* y equipos de secado para forzar a las bacterias a generar esporas, pasos bastante estándar para cualquier instalación industrial dedicada a la producción de organismos vivos. La verdadera innovación residía en las siguientes etapas. A las esporas se les añadieron ciertas sustancias (aún no sabemos cuáles) para evitar que se aglomerasen y fuesen demasiado grandes para alcanzar los alvéolos pulmonares al ser inhaladas. A continuación, el producto resultante se secaba de nuevo y se trituraba hasta obtener un polvo fino, capaz de penetrar en los pulmones. Finalmente, este se almacenaba en tanques de acero inoxidable.

Inevitablemente, el ciclo de secado y molido causaba la propagación de esporas mortales por todo el edificio. Los trabajadores vestían trajes de protección contra materiales peligrosos, pero el aire de las instalaciones también tenía que limpiarse antes de ser expulsado al exterior. La solución fue bastante sencilla. Los gases de escape contaminados se hacían pasar por una serie de filtros para eliminar partículas grandes, como las del polvo normal, y pequeñas, como las esporas del carbunco.

En algún momento del 2 de abril de 1979, mientras los secadores estaban apagados, el equipo del turno de día de la unidad de producción quitó dos filtros para comprobar si funcionaban bien. Más tarde afirmó que había notificado al centro de operaciones que hasta que no se reemplazasen los filtros no debía usarse aquel secador en particular. Pero por alguna razón, los trabajadores del turno de noche no recibieron el mensaje y comenzaron el ciclo habitual de fabricación y secado. Debido a que faltaban algunos de los filtros de la serie, uno de los que quedaban se obstruyó y estalló, causando un aumento repentino de la presión en el sistema de tratamiento de aire. Un trabajador notó el cambio inmediatamente, y los 30 o 40 miembros del equipo nocturno se apresuraron a cerrar el sistema. Pero el proceso de producción era complejo y no pudieron detenerlo enseguida; tardaron tres horas en lograrlo, tiempo en el que un número desconocido de esporas fue expulsado por la chimenea sin que nada lo impidiera. Cuando el equipo del turno de noche se dio cuenta de lo sucedido, su jefe advirtió del accidente al comandante del Cuartel 19, el general V. V. Mikhaylov. Este informó a la sede del Ministerio de Defensa en Moscú y le indicaron que no hiciera nada. Luego, la KGB confiscó todas las historias clínicas y los informes de las autopsias de las víctimas.



MICROBIOS MALIGNOS: Colonias de *Bacillus anthracis* cultivados en una placa de agar en el laboratorio.

SCOTT CAMAZINE, SCIENCE SOURCE

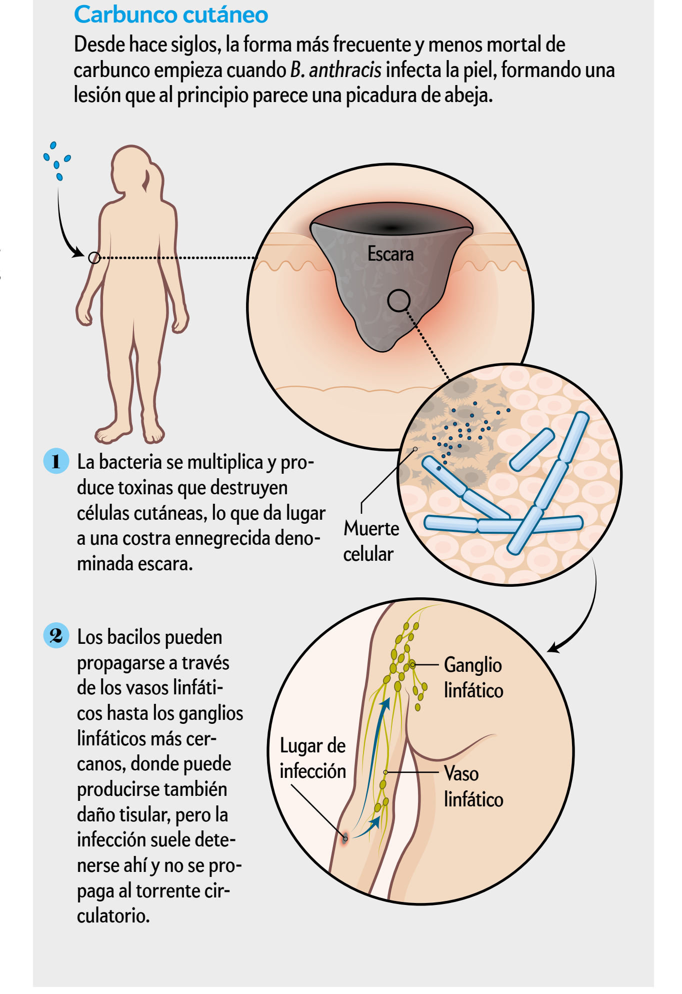
Aunque nadie sabe cuántas esporas escaparon del Cuartel 19 durante el incidente, algunos expertos estimaron más tarde que debió de ser entre 0,5 y 1 kilogramo de material contaminado, que contendría entre unos pocos miligramos y un gramo de esporas. Suponiendo que estas fueran viables y de fácil propagación, habrían infectado a varios cientos de miles de personas de Sverdlovsk, que por entonces tenía 1,2 millones de habitantes. Afortunadamente, los vientos dominantes soplaron fuera del centro urbano y sobre los barrios más escasamente poblados.

CONSECUENCIAS

Poco a poco, se han ido conociendo nuevos aspectos de la biología de la cepa responsable de la tragedia de Sverdlovsk. En los años noventa, Matthew Meselson, de la Universidad Harvard, dirigió dos investigaciones médicas y epidemiológicas en Sverdlovsk. Los avances en biotecnología también han permitido analizar con más detalle las muestras de las autopsias que los médicos rusos compartieron con los equipos internacionales cuando hubo más cooperación durante los años noventa.

Tres tipos de carbunco

La bacteria *Bacillus anthracis* causa enfermedad de diferentes maneras, según su vía de entrada en el cuerpo (*derecha*). Sin embargo, si la infección se propaga al torrente circulatorio, puede causar la muerte en poco tiempo. *B. anthracis* se halla de forma natural en todo el mundo y algunas de sus características la convierten potencialmente en una arma biológica muy efectiva. Una de ellas es su capacidad de producir esporas duraderas, que pueden tratarse químicamente y pulverizarse para reducirlas a un tamaño que les permita penetrar en los pulmones, donde pueden desencadenar la forma más mortal de carbunco.



Truco de supervivencia: animación suspendida

Espora
Espora en germinación
Toxinas
Bacilo

El patógeno que causa el carbunco puede existir de dos formas: como un bacilo que se multiplica y libera toxinas que dañan los tejidos, o como esporas duras que se hallan en estado latente. Las esporas se forman cuando las condiciones son demasiado secas para que los bacilos sobrevivan. Pero cuando resultan favorables (como en el interior del cuerpo, húmedo y con una gran cantidad de nutrientes) las esporas germinan y se liberan numerosos bacilos infecciosos.

Uno de nosotros (Walker) acompañó a Meselson en el primer viaje y se reunió con patólogos locales para comprender mejor lo sucedido. Más tarde, uno de ellos (Lev Grinberg) llevó a EE.UU. muestras de las autopsias de las víctimas (fijadas con seguridad en formalina y embebidas en parafina) para su estudio posterior. Otro de nosotros (Keim) trabajó con Paul Jackson, por entonces en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, para extraer el ADN de las muestras, lo que confirmó que los pacientes fallecieron de carbunco. Análisis posteriores de otros científicos revelaron un perfil genético único para la cepa de Sverdlovsk, también conocida como *B. anthracis* 836.

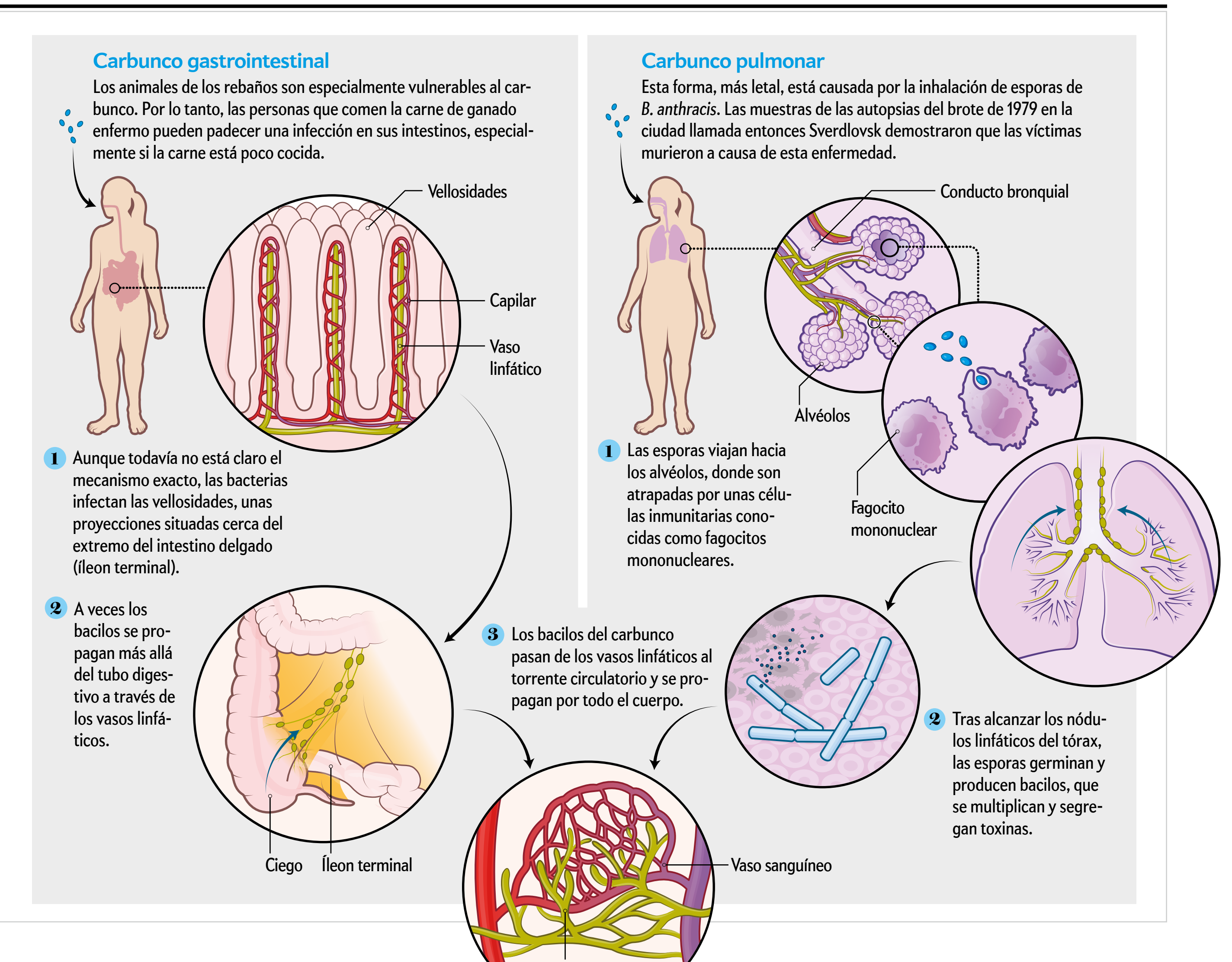
Con esta información molecular, la ciencia puede hoy rastrear la cepa a escala global. En 2001, algunos investigadores (entre ellos Keim) determinaron que los ataques con cartas de carbunco que se llevaron a cabo en EE.UU. y mataron a cinco personas no utilizaron la cepa de Sverdlovsk. Pero aun así, solo se conocieron pequeñas partes del genoma de la cepa de aquel accidente y quedaron muchas preguntas por responder.

Finalmente, en 2015, la tecnología había avanzado hasta el punto de que Keim y otros lograron recrear toda la secuencia genética de *B. anthracis* de las muestras de la autopsia de dos víctimas de carbunco de Sverdlovsk. Las bacterias de ambas muestras resultaron ser idénticas entre sí y coincidían con *B. anthracis* 836. El análisis genético, publicado en 2016, demostró que la cepa pertenecía al grupo conocido como «Trans Eurasia». Además, los autores no hallaron pruebas de que se hubiera modificado genéticamente para aumentar la virulencia, resistir los antibióticos o impedir la protección de una vacuna. En otras palabras, los científicos militares soviéticos habían descubierto y desarrollado una bacteria idónea, lo suficientemente letal en su estado natural para ser utilizada como arma.

Todo lo que hemos aprendido sobre el asunto de Sverdlovsk también sirve como un recordatorio serio de que la mejor manera de minimizar las bajas de un ataque de carbunco es actuar antes de que las esporas se hayan dispersado. A pesar de gastar miles de millones de dólares en investigación sobre biodefensa, el Gobierno de EE.UU. todavía lucha por coordinar y priorizar sus actividades en múltiples agencias con diferentes misiones y objetivos. La única vacuna disponible en EE.UU., cuyas pruebas muestran que puede prevenir la enfermedad después de la exposición a *B. anthracis*, requiere bastantes inyecciones durante varios meses, seguida de dosis de recuerdo regulares.

Nadie sabe si todavía existe *B. anthracis* producido por la Unión Soviética. En virtud de los acuerdos entre EE.UU., Uzbekistán y Kazajistán, en estas antiguas repúblicas soviéticas en los años noventa se hicieron inertes muchas toneladas de material con esporas, y algunas instalaciones de producción se transformaron para su uso civil (bajo la vigilancia de científicos

TAMI TOLPA



internacionales). Pero no se ha permitido a ningún grupo extranjero visitar, ni mucho menos inspeccionar, los tres ministerios de Defensa ni cinco institutos civiles «antiplagas» de Rusia que participaron en la investigación y producción de agentes para armas biológicas.

Desde 2003, el Departamento de Estado de EE.UU. ha emitido nueve informes de control de armas, y en todos se afirma que Rusia podría estar apoyando actividades que violan el tratado de 1972. Los informes no ofrecen detalles sobre los que se basa esta argumentación (quizá se trate de información clasificada), pero hay muchas razones para preocuparse. Entre ellas, las imágenes de satélite públicas muestran que algunos edificios del Cuartel 19 han sido mejorados con nuevos equipamientos, que parecen ser unidades de ventilación, y que se han añadido nuevos edificios. Además, en 2012 Putin escribió un artículo en un periódico ruso en el que comentaba que en el futuro probablemente aparecerían «sistemas de armas basados en nuevos principios (haces, ondas, geofísica, genética, psicofísica y otras tecnologías)». El ministro de Defensa más tarde afirmó que su departamento estaba avanzando hacia esos objetivos. Paralelamente, Putin permitió un acuerdo de cooperación de casi 25 años de duración entre EE.UU. y Rusia con el fin de desmantelar algunos de sus arsenales nucleares para que dejasen de existir en 2015.

A pesar de estos preocupantes indicios públicos (y de cualquier información secreta que posean los Gobiernos occidentales), las recientes administraciones estadounidenses, en la medida de lo que se sabe, no se han enfrentado al Gobierno ruso para plantear las posibles violaciones del tratado sobre armas biológicas. Tampoco parece probable que lo haga la actual Administración. Sin embargo, con su inactividad, el Gobierno de EE.UU. puede estar dando a Rusia luz verde para desarrollar armas biológicas avanzadas contra las que otros países estarían mal preparados para defenderse.

PARA SABER MÁS

The soviet biological weapons program: A history. Milton Leitenberg y Raymond A. Zilinskas. Harvard University Press, 2012.
Assessing the bioweapons threat. Crystal Boddie et al. en *Science*, vol. 349, págs. 792-793, 21 de agosto de 2015.
A history of anthrax. Centers for Disease Control and Prevention. Published online August 15, 2016. **www.cdc.gov/anthrax/resources/history**

EN NUESTRO ARCHIVO

El carbunco y su capacidad letal. Willy Hansen y Jean Freney en *IyC*, marzo de 2002.
La lucha contra el carbunco. John A. T. Young y R. J. Collier en *IyC*, mayo de 2002.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Insectos sobre el agua

Los objetos pequeños que flotan en un líquido pueden atraerse o repelerse en función de cómo deformen la superficie

Ciertos insectos, como los zapateros (*Gerris lacustris*), caminan sobre el agua gracias a los extremos hidrófobos de sus patas. El efecto se explica porque el agua, como los demás líquidos, presenta tensión superficial: su superficie puede compararse a una cama elástica tensa. Pero ¿cómo consiguen salvar la pendiente que forma la superficie del agua cerca de la orilla o de la vegetación? La tensión superficial sigue siendo clave en la explicación, pero aquí habremos de olvidarnos de la imagen de la cama elástica y reconsiderar los principios de la flotabilidad. Y, de paso, entenderemos por qué los cereales que sobrenadan en leche tienden a aglomerarse.

Los barcos flotan gracias al empuje de Arquímedes, el cual equivale al peso del agua desplazada. Pero ¿qué ocurre con los objetos o los animales pequeños, a escalas en las que no podemos despreciar los efectos de la tensión superficial? En la proximidad de un objeto flotante, la superficie del agua se curva y forma lo que llamamos un «menisco», el cual puede ser cóncavo o convexo. Las fuerzas de tensión superficial se ejercen a lo largo de toda la línea de contacto entre el objeto y el agua. Por su parte, el empuje de Arquímedes depende de la porción de objeto sumergida.

¿Cómo determinar la resultante de las fuerzas de tensión superficial? Un razonamiento ingenioso conduce a un resultado particularmente simple. Tomemos dos recipientes iguales, uno de ellos (A) lleno de agua, y otro (B) en el que habremos introducido un objeto pero de forma que, al final, el agua se encuentre a la misma altura que en el primero. Nótese que, para ello, habremos de retirar o añadir una cantidad de líquido igual al volumen de agua desplazada por el cuerpo flotante.

En virtud de las leyes de la hidrostática, la fuerza sobre el fondo del recipiente es la misma en ambos casos. En A, dicha fuerza equivale al peso del agua. Así pues, podemos deducir que el peso del objeto que flota en B ha de ser igual al peso del agua retirada o añadida (es decir, la que había desplazado el objeto).

El volumen desplazado tiene dos componentes. Una corresponde al agua cuyo peso es igual al empuje hidrostático que se ejerce sobre la parte sumergida del objeto: se trata de la columna de agua que se apoya en la línea de contacto y que se extiende hasta el nivel medio del líquido (*véase la figura superior en página opuesta*). La otra componente se encuentra relacionada con la tensión superficial. Si el menisco es convexo, el objeto hunde la superficie del líquido, por lo que el cuerpo desplazará un volumen de agua mayor que el definido antes. El desplazamiento de ese volumen suplementario genera una fuerza ascendente que se añade al empuje de Arquímedes: esa es la resultante de las fuerzas de tensión superficial. Dicha fuerza explica por qué, en ocasiones, los cuerpos más densos que el agua pueden flotar. El zapatero, por ejemplo, al apoyar sobre la superficie sus frágiles patas cubiertas de pelos hidrófobos, desplaza una cantidad de agua cuyo peso iguala al de todo el insecto. En cambio, cuando el menisco es cóncavo, el volumen de agua desplazada es inferior al volumen de la parte sumergida. En tal caso, la resultante de las fuerzas de tensión superficial apunta hacia abajo.



Gravedad y capilaridad

¿Qué les ocurre a dos objetos que flotan a poca distancia uno de otro? Cuando eso ocurre, la deformación que inducen en la superficie del agua crea entre ambos una fuerza lateral. A grandes rasgos, podemos distinguir dos efectos.

El primero es, en esencia, gravitatorio: como en una cama elástica, si ponemos dos objetos que hundan la superficie del agua (que generen meniscos convexos), cada uno se acercará al otro deslizándose por la pendiente creada por este. Sin embargo, lo mismo ocurre cuando los cuerpos forman meniscos cóncavos. En tal caso, dado que la tensión superficial tira de ellos hacia abajo, se trata de cuerpos menos densos que el agua y que se hunden más de lo que lo harían en ausencia de tensión superficial. Frustrada su tendencia natural a flotar debido a la presencia de esas fuerzas superficiales, «aprovechan»



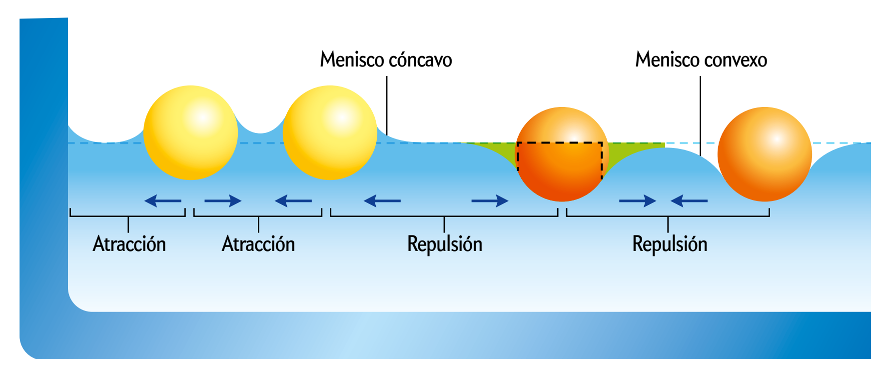
LOS CEREALES QUE FLOTAN en la superficie de la leche tienden a agruparse. Dicho fenómeno se debe las deformaciones que inducen los copos sobre la superficie del líquido.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

la pendiente creada por el otro acercándose a él para elevarse más. ¿Y qué sucede si acercamos un objeto que hunde el agua y otro que la eleva? El primero bajará por la pendiente creada por el segundo y este remontará la creada por el primero. En otras palabras: uno y otro tenderán a alejarse, por lo que el efecto neto será de repulsión.

El segundo efecto guarda relación con la capilaridad. El acercamiento de los dos objetos modifica el nivel del agua. Con dos meniscos cóncavos, por ejemplo, el nivel entre los cuerpos se elevará. En el puente capilar así creado, la presión hidrostática es más débil que en el líquido situado más abajo, donde tiene lugar la mayor parte del contacto entre el agua y ambos objetos. El puente capilar, por tanto, atrae un cuerpo hacia el otro. Además, dado que cambia la línea de contacto entre el objeto y la superficie, se modifican también las fuerzas de tensión superficial. El resultado no es fácil de determinar, pero puede demostrarse que, cuando se acercan dos meniscos del mismo tipo (cóncavos o convexos), el área de la interfaz aire-agua disminuye, lo que resulta energéticamente favorable.

Así pues, ya se trate del efecto gravitatorio o del capilar, los objetos que forman meniscos del mismo tipo se atraen, mientras que los que generan meniscos distintos se repelen. Un tratamiento más detallado muestra que el efecto gravitatorio predomina cuando la dimensión característica de los objetos es muy inferior a la longitud capilar; es decir, la extensión característica de los meniscos (unos 2,7 milímetros para el agua). Así ocurre con las pequeñas burbujas que aparecen y se agrupan cuando se vierte una bebida. Sin embargo, en los objetos que miden varios milímetros, como los copos de cereales, la atracción resultante se debe a una combinación de ambos efectos.



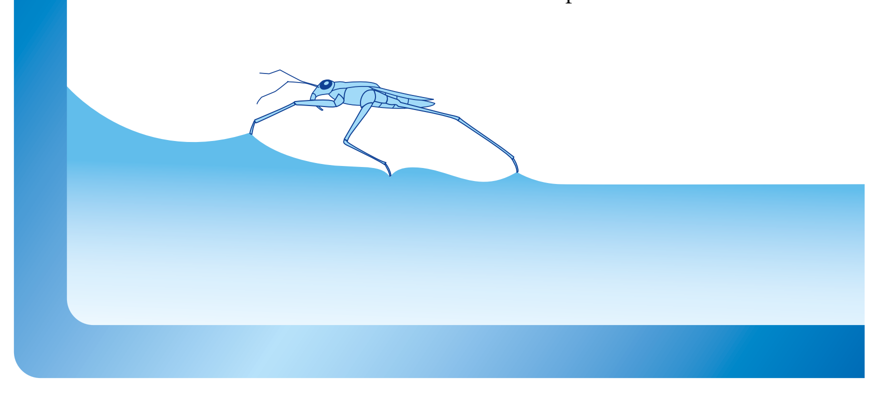
LOS TIPOS DE MENISCOS (cóncavos o convexos) que forman dos objetos flotantes determinan si se atraen o se repelen. Cuando ambos son del mismo tipo, la fuerza resultante entre los objetos es atractiva; en caso contrario, será repulsiva. Para la bola naranja, la imagen indica el volumen de agua desplazada cuyo peso corresponde al empuje de Arquímedes (*volumen delimitado por la línea de puntos*) y aquel cuyo peso corresponde a la resultante de las fuerzas de tensión superficial (*volumen en verde*).

Caminar en el agua

Los fenómenos que acabamos de describir tienen consecuencias sorprendentes para la vida acuática. Los meniscos que se forman en torno a las ramas de las plantas o las hojas flotantes suelen ser cóncavos. En principio, constituyen un obstáculo importante para un insecto que camine sobre el agua: no solo dan lugar a unas pendientes deslizantes de tamaño similar al del animal, sino que, más aún, tienden a repelerlo, ya que los meniscos que crean sus patas son convexos. Así pues, ¿cómo consiguen avanzar?

El zapatero puede saltar esa distancia, pero no así la chinche de agua *Mesovelia*. No obstante, las patas de esta última poseen unas garras retráctiles hidrófilas. El insecto se sirve de ellas en cada pata delantera para tirar hacia arriba de la interfaz aire-agua y crear así un menisco cóncavo. Para conservar la horizontalidad y no volcar, aplica una fuerza de magnitud similar en las patas traseras y, al mismo tiempo, consigue un punto de apoyo repeliendo la superficie con sus patas centrales.

De esta manera, a pesar de que el insecto ejerce unas fuerzas de decenas de micronewtons, equivalentes a unas diez veces su propio peso, consigue mantenerse en equilibrio sobre la superficie. El animal crea seis meniscos: dos cóncavos delante, otros dos cóncavos detrás y dos convexos en el centro. Entre el menisco de la rama y los de las patas delanteras se ejerce una fuerza de atracción... así como una de repulsión sobre las patas centrales. Sin embargo, esas fuerzas de capilaridad disminuyen rápidamente con la distancia a la rama, de modo que predomina la atracción y, sin grandes esfuerzos, nuestro insecto consigue alcanzar el apoyo deseado.



PARA ACERCARSE A LA ORILLA, la chinche de agua *Mesovelia* ha de remontar una pendiente. Para ello se sirve de los meniscos que crea con las patas, los cuales tiran o empujan la superficie del líquido. Gracias a las fuerzas de atracción y repulsión entre meniscos, el insecto puede llegar sin problemas hasta la orilla.

PARA SABER MÁS

Surface tension force on a partly submerged body. Joseph B. Keller en *Physics of Fluids*, vol. 10, págs. 3009-3010, julio de 1998.
The Cheerios effect. Dominic Vella y L. Mahadevan en *American Journal of Physics*, vol. 73, págs. 817-825, febrero de 2005.
Meniscus-climbing insects. David L. Hu y John W. M. Bush en *Nature*, vol. 437, págs. 733-736, septiembre de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

Contemplando la conducta de los zapateros, insectos que patinan (y corren) sobre el agua. Jearl Walker en *IyC*, enero de 1984.
Tensiones superficiales. Wolfgang Bürger en *IyC*, marzo de 2002.

por Bartolo Luque



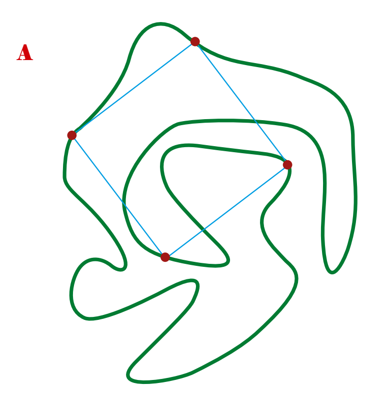
Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

El problema del cuadrado inscrito en la curva

Una conjetura casi resuelta

En 1911, el matemático alemán Otto Toeplitz propuso la siguiente conjetura: toda curva cerrada simple admite al menos un cuadrado inscrito en ella. Una curva cerrada simple es una curva continua, cerrada y que no se corta consigo misma. Por ejemplo, una elipse es una curva cerrada simple, pero una con forma de 8 no. Que sea continua quiere decir que puede dibujarse sin levantar el lápiz del papel, y «cuadrado inscrito» significa que existen cuatro puntos pertenecientes a la curva que forman los vértices de un cuadrado. La figura *A* nos muestra un ejemplo.

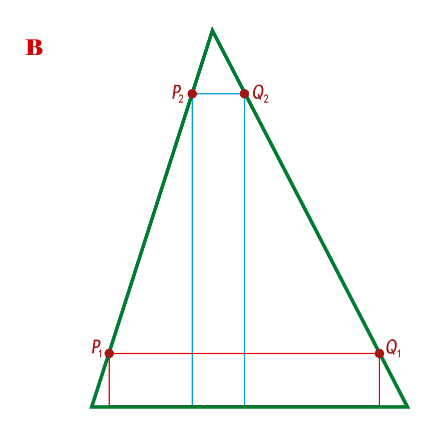
A



El problema del cuadrado inscrito, conocido también como conjetura de Toeplitz, pertenece a esa clase de enunciados simples y ya centenarios que muchos matemáticos han intentado dilucidar sin éxito. Para ilustrar la cuestión, resolvamos un caso particular de curva simple cerrada: un triángulo T cualquiera en el plano. ¿Podemos encontrar siempre un cuadrado inscrito en él?

Dado un triángulo, siempre podemos inscribir en él dos rectángulos como los de la figura *B*. Uno de ellos, el azul, es más alto que ancho; el otro, el rojo, es más ancho que alto. Si ahora movemos el vértice P_1 sobre el lado del triángulo hacia P_2, al tiempo que movemos Q_1 en dirección a Q_2, el rectángulo rojo se irá haciendo más alto y menos ancho hasta convertirse en el azul. Si hemos pasado de manera continua de un rectángulo más ancho que alto a otro más alto que ancho, en algún momento nuestro rectángulo tuvo que ser igual de ancho que de alto; es decir, un cuadrado. Sorprendente.

B



Casos particulares

Observemos que en nuestra demostración no explicitamos ninguna solución concreta (por ejemplo, cómo determinar los vértices del cuadrado en función de los de T). Se trata de una típica demostración de existencia. Esta clase de demostraciones suelen desesperar a físicos e ingenieros, que pueden enviar la ecuación diferencial de un modelo a un amigo matemático con la esperanza de que la resuelva y recibir como respuesta: «La solución existe y es única». Los matemáticos, sin embargo, suelen encontrar tales demostraciones bellas e ingeniosas, diamantes que les permiten continuar sus investigaciones desembarazándose de la necesidad de hallar soluciones concretas.

Hemos de subrayar que, a pesar de que nos hemos apoyado en un dibujo, nuestro argumento no ha sido geométrico, sino topológico. Se sustenta en el teorema del valor intermedio, que, cómo no, es un teorema de existencia. Podemos enunciarlo de la siguiente manera: si $f(x)$ es una función continua definida en el intervalo $[a,b]$, entonces para cada valor y tal que $f(a) < y < f(b)$, existe al menos un valor intermedio c en el intervalo $[a,b]$ que cumple $f(c) = y$. En nuestro caso, hemos aplicado veladamente un caso particular conocido como teorema de Bolzano. Este nos dice que si $f(a)$ y $f(b)$ tienen distinto signo, entonces existe al menos un valor intermedio c en el intervalo $[a,b]$ tal que $f(c) = 0$. En nuestra demostración, f sería la diferencia entre la anchura y la altura del rectángulo.

Al poco de ser enunciada, la conjetura de Toeplitz fue demostrada por el matemático Arnold Emch, primero para curvas cerradas simples convexas y luego para curvas analíticas por partes. Durante los últimos cien años, muchas variantes más sencillas del problema se han resuelto con éxito, como el caso del triángulo inscrito o el de curvas simples cerradas simétricas con respecto al origen (*véanse los recuadros*), por mentar un par de ejemplos.

En 1989, el matemático Walter Stromquist consiguió obtener una demostración para toda curva localmente monótona. Se trata de una demostración casi definitiva porque engloba todas las curvas que podemos dibujar con un lápiz: aquellas que responden a nuestra noción intuitiva de curva continua cerrada. Pero, por raro que parezca, el conjunto de curvas localmente monótonas es de medida nula con respecto al conjunto de todas las curvas cerradas simples (algo parecido a lo que ocurre, por ejemplo, con el conjunto de los números reales computables con respecto al de los números reales). La razón principal por la que la cuestión sigue abierta se debe a que una curva cerrada simple puede ser un objeto monstruoso. Así ocurre con la curva de Koch, que no es diferenciable en ningún punto; con la de Peano, que llena por completo la superficie de un cuadrado, y con otras curvas fractales.

Una joya topológica

Vamos a acabar demostrando una variante de la conjetura: que, dada una curva simple cerrada, siempre existen cuatro puntos en ella que forman un rectángulo. La prueba, lograda por H. Vaughan en 1977, es puramente topológica y de una belleza extraordinaria.

Comencemos haciendo notar que, dado un rectángulo arbitrario $PQ'QP'$, las diagonales PQ y $P'Q'$ miden lo mismo y se cruzan en su punto medio (*véase la figura C*). O, lo que es lo mismo, si la longitud del segmento PQ es la misma que la del segmento $P'Q'$ y estos se cruzan en sus puntos medios, entonces los cuatro puntos en cuestión conforman los vértices de un rectángulo.

Nuestra curva cerrada simple siempre es parametrizable: cada punto $P(x,y)$ de la curva puede caracterizarse a través de sus

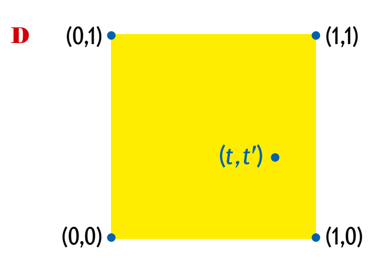
C

P Q′ P′ Q

coordenadas cartesianas $x(t)$ e $y(t)$, donde t toma valores en el intervalo $[0,1]$. Dado que se trata de una curva cerrada, el punto inicial ($t = 0$) y el final ($t = 1$) coinciden: $x(0) = x(1)$ e $y(0) = y(1)$. Así que podemos establecer una biyección continua entre los puntos de la curva y una circunferencia de perímetro unidad.

Desde el punto de vista topológico, decimos que dos objetos son el mismo si podemos establecer un *homeomorfismo* entre ellos: una correspondencia continua, biyectiva y con inversa continua.

D



Intuitivamente, suele decirse que dos objetos son homeomorfos si podemos convertir uno en el otro mediante dobleces y estiramientos. Así, por ejemplo, una circunferencia resulta topológicamente idéntica al perímetro de un rectángulo, pero no a un segmento.

Ahora podemos establecer un homeomorfismo entre todos los pares posibles de puntos $\{P,Q\}$ pertenecientes a nuestra curva y los puntos del cuadrado unidad. Para ello, si P tiene coordenadas $(x(t),y(t))$ y Q tiene coordenadas $(x(t'),y(t'))$, el par $\{P,Q\}$ quedará representado por el punto de coordenadas cartesianas (t,t') (*véase la figura D*).

Sin embargo, hemos de tener en cuenta una sutileza. Dado que nuestra curva es cerrada, los pares de puntos con coordenadas $(0,t)$ (*borde rojo izquierdo del cuadrado de la figura E*) coinciden con los de coordenadas $(1,t)$ (*borde rojo derecho*). Lo mismo ocurre con los lados superior e inferior (*bordes verdes*): los puntos $(t,0)$ y $(t,1)$ corresponden al mismo punto en la curva. Por tanto, para evitar repetir puntos y que nuestra relación sea biyectiva y continua, habremos de unir los bordes del cuadrado según indican las flechas. Al hacerlo, nuestro cuadrado se convierte en la superficie de un toro (*véase la figura E*).

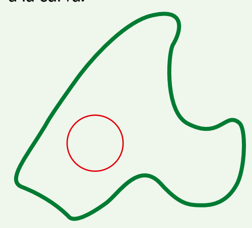
Por otro lado, con miras a nuestra demostración no necesitaremos distinguir el orden de los pares de puntos de la curva; es decir, identificaremos los pares $\{P,Q\}$ y $\{Q,P\}$. Desde el punto de vista de nuestro cuadrado, lo anterior implica que $(t,t') = (t',t)$. Eso significa que basta con que nos ciñamos a la mitad de nuestro cuadrado, el cual ya contiene todos los pares no ordenados de puntos. En otras palabras: el conjunto de todos los pares no ordenados de puntos de nuestra curva es topológicamente idéntico al triángulo de la figura F.

La base de nuestro triángulo representa los puntos $(t,0)$, y la altura, los puntos $(1,t)$. Pero, como nuestra curva es cerrada y el orden de los puntos no importa, tenemos que $(t,0) = (0,t) = (1,t)$. Por tanto, hemos de pegar estos dos bordes respetando el sentido indicado por las fle-

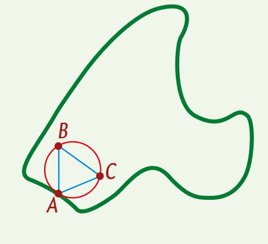
EL PROBLEMA DEL TRIÁNGULO INSCRITO

Vamos a demostrar que, si tenemos una curva simple cerrada y T es un triángulo cualquiera, entonces la curva tiene siempre inscrito un triángulo similar a T.

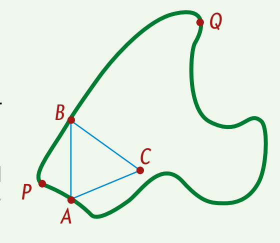
1 Dibujemos un círculo interior a la curva.

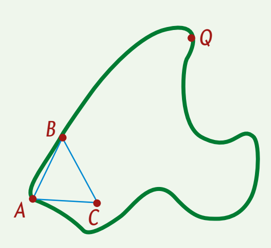


2 Lo movemos en una dirección arbitraria hasta que toque la curva en un punto que llamaremos A. Siempre es posible inscribir en el círculo un triángulo ABC similar a T, siendo BC el lado mayor.



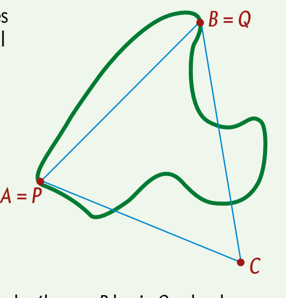
3 Movamos los vértices B y C de manera que se mantenga la semejanza con T, hasta que uno toque la curva (si ambos lo hacen simultáneamente ya hemos acabado, pues habremos encontrado un triángulo inscrito similar a T). Sin pérdida de generalidad, supongamos que se trata de B. Localicemos ahora el par de puntos P y Q de la curva más alejados entre sí y, manteniendo la posición de B, movamos A a P. Al mismo tiempo, desplacemos C de tal modo que se mantenga la semejanza del triángulo resultante con T.





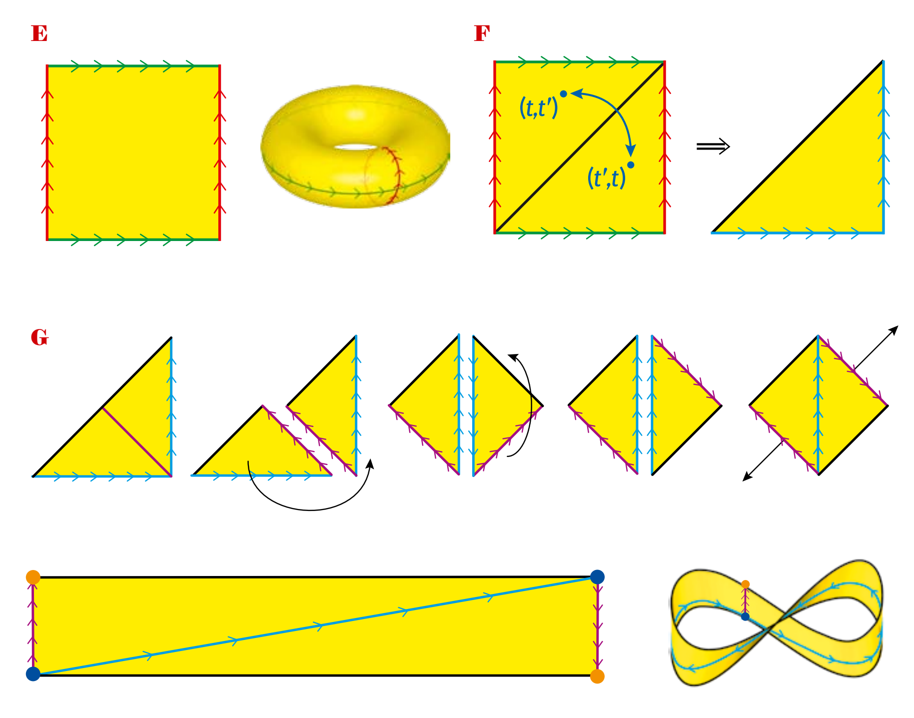
4 Manteniendo fijo ahora A en P, movamos B a Q a través de la curva y desplacemos C de nuevo para que el triángulo siga siendo similar al original.

5 Recordemos que BC es siempre mayor o igual que AB, que ahora es la máxima distancia entre dos puntos cualesquiera de la curva. Así que C, o bien cae sobre la curva y ya tenemos nuestro triángulo, o bien está fuera de la curva. En este último caso, mientras desplazábamos B hacia Q sobre la curva, C pasó de estar en el interior a encontrarse en el exterior, por lo que antes o después tuvo que cruzar la curva. En ese momento, los puntos ABC conforman el triángulo inscrito buscado.



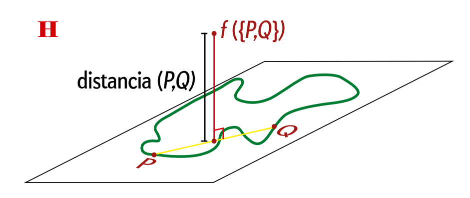
chas azules. (El truco consiste en cortar el triángulo en dos mitades idénticas y pegarlas adecuadamente para mantener la continuidad; *véase la figura G.*)

No resulta difícil convencerse de que el resultado es una banda de Möbius cuyos bordes corresponden a la diagonal de nuestro cuadrado inicial: los puntos (t,t) o, lo que es lo mismo, los pares de puntos $\{P,P\}$ de nuestra curva. Así pues, hemos establecido un homeomorfismo entre todos los pares no ordenados de puntos de nuestra curva cerrada y los puntos de una banda de Möbius.



El rectángulo inscrito

Ahora definamos una función f que, a cada par no ordenado de puntos $\{P,Q\}$ de la curva, le asignará un punto (x,y,z) del espacio de la siguiente manera: las dos primeras coordenadas, x e y, serán las del punto medio del segmento que une P y Q, mientras que z será la distancia entre ellos (*véase la figura H*).



Esta función define una superficie en el espacio. Dicha superficie es continua porque pequeños desplazamientos en P o en Q se traducen en pequeños desplazamientos sobre la superficie. Además, cada uno de los puntos $P(x,y)$ de la curva pertenece a la superficie, pues, bajo nuestra función, $f(\{P,P\}) = (x,y,0)$.

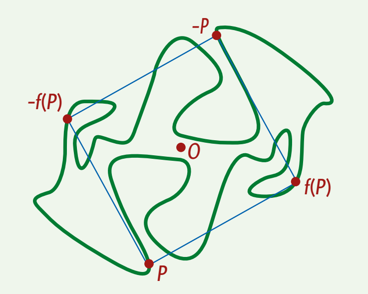
Dado que el conjunto de pares no ordenados de puntos $\{P,Q\}$ de la curva es homeomorfo a la cinta de Möbius, nuestra función f puede interpretarse como una que va de la cinta de Möbius a la superficie que acabamos de definir. Pero recordemos que los pares de puntos $\{P,P\}$ corresponden al borde de la cinta, y que en esos puntos la superficie toca la curva. Por tanto, por continuidad, nuestra función f lleva el borde de la cinta de Möbius a nuestra curva cerrada.

Existe un teorema que lo demuestra, pero resulta intuitivamente claro que es imposible llevar el borde de la curva de Möbius a una curva definida sobre un plano sin que se produzcan «colisiones»; es decir, sin que varios puntos de la cinta (pares $\{P,Q\}$) se toquen. Cuando eso ocurra, la función f asociará a tales pares de puntos el mismo punto (x, y, z) de la superficie. De modo que habrá al menos dos pares de puntos de la curva que tendrán el mismo punto medio y que se encontrarán a la misma distancia. Y si es así, forman un rectángulo. Delicioso.

Si quieren «ver» esta demostración no se pierdan el vídeo de Youtube *Who cares about topology? (Inscribed rectangle problem)*, del canal de matemáticas 3Blue1Brown. Es una obra de arte que me recomendó Juan M. Parrondo, antiguo firmante de esta columna, y que sembró la semilla de este artículo. IyC

CURVAS SIMÉTRICAS CON RESPECTO AL ORIGEN

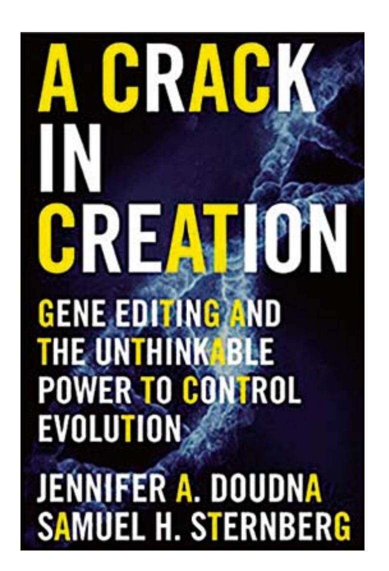
Demostremos ahora que toda curva simple cerrada J simétrica con respecto al origen posee un cuadrado inscrito. Puesto que nuestra curva es simétrica con respecto al origen O, cada punto P de la misma posee su simétrico, $-P$, el cual también pertenece a ella.



Definamos la función f que rota los puntos del plano $\pi/2$ radianes. Sean $P_{máx}$ y $P_{mín}$ los puntos de la curva que se encuentran a la distancia máxima y mínima del origen. Notemos que $f(P_{máx})$ estará en el exterior de la curva o sobre ella, y que $f(P_{mín})$ estará en el interior o sobre la curva. Si ambos están sobre la curva, habremos encontrado dos puntos de J cuyas imágenes (esos mismos puntos rotados un ángulo recto con respecto al origen) también pertenecen a ella; es decir, cuatro puntos de la curva que forman un cuadrado. En caso contrario, $f(J)$, la curva J rotada $\pi/2$ radianes, conecta un punto exterior de J con uno interior, de modo que J y $f(J)$ se cortan en P. Por tanto, los puntos P, $f(P)$, $-P$ y $f(-P)$ formarán un cuadrado.

PARA SABER MÁS

Equilateral triangles and continuous curves. M. D. Meyerson en *Fundamenta Mathematicae*, vol. 110, págs. 1-9, 1980.
Rectangles and simple closed curves. Charla de H. Vaughan citada en «Balancing acts», por M. D. Meyerson en *Topology Proceedings*, vol. 6, págs. 59-75, 1981.
Rectangles inscribed in symmetric continua. M. J. Nielsen y S. E. Wright en *Geometriae Dedicata*, vol. 56, págs. 285-297, 1995.
Figures inscribed in curves: A short tour of an old problem. M. J. Nielsen en **www.webpages.uidaho.edu/~markn/squares**



A CRACK IN CREATION
GENE EDITING AND THE UNTHINKABLE POWER TO CONTROL EVOLUTION

Jennifer A. Doudna y Samuel H. Sternbert
Houghton Mifflin, 2017

CRISPR: la pugna por la narrativa

Heroísmo pero pocos matices en el relato en primera persona de una de las grandes protagonistas de la actual revolución en genética

La expectativa de leer las memorias de Jennifer Doudna, una protagonista clave en la historia de CRISPR, acelera el pulso. Y, en efecto, *A crack in creation* ofrece una más que bienvenida perspectiva sobre la revolucionaria técnica de edición del genoma que pone el poder de la evolución en manos humanas, con numerosas anécdotas y detalles que solo las personas cercanas a ella habrían podido saber. Sin embargo, se echa a faltar la introspección inquisitiva, el análisis ético matizado y el contrapunto moral que reclamaría todo aquel vivamente interesado en la técnica CRISPR, como quien escribe.

Después de la carrera que condujo al descubrimiento, vino la pugna por hacerse con la narrativa del hallazgo. No en vano, hay muchísimo en juego en torno al sistema CRISPR-Cas. En febrero de este año, la Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos se pronunció en contra de Doudna y de la Universidad de California en Berkeley. El organismo consideró que una patente versada en la aplicación de CRISPR a las células eucariotas, presentada por Feng Zhang, de Harvard y el Instituto Broad del MIT, no interfería con la patente de Berkeley, más amplia, sobre ingeniería genética con CRISPR.

Puede que la batalla haya terminado, pero no así la guerra. Berkeley ya ha apelado la decisión; entretanto, la Oficina Europea de Patentes ha fallado a favor de Doudna y Berkeley. Sin duda, este versátil sistema dará como fruto muchas más patentes... por no hablar de algunas de las medallas de oro de 66 milímetros que cada año se otorgan en Estocolmo.

El Instituto Broad ha llevado hasta ahora la voz cantante en el relato. No escaso de fondos ni de talento, el centro aúna la sensualidad de la tecnología punta con el espíritu de la Costa Este y la alcurnia asociada. El año pasado, el director, Eric Lander, publicó un hoy tristemente famoso artículo titulado «Los héroes de CRISPR» en *Cell*. En él adoptaba un tono de generosidad al reconocer las contribuciones del bioquímico lituano Virginijus Siksnys por sus observaciones iniciales que «allanaron el camino hacia la ingeniería de las endonucleasas del ADN guiadas por ARN programables y universales», así como las de Doudna y la codescubridora de CRISPR, Emmanuelle Charpentier, por señalar «las posibilidades de la aplicación del sistema en la edición genómica programable con ARN».

De las palabras de Lander se deducía a las claras que los aludidos habían sentado las bases, pero que había sido el grupo de Zhang el que había llevado a CRISPR hasta la línea de meta. Para muchos de nosotros, tales tácticas convierten al equipo de Broad en los villanos de la historia.

El libro de Doudna era una oportunidad para propinar un merecido golpe demoledor. Pero, en lugar de ello, lo que nos brinda es un contrarrelato elaborado como el artículo de Lander. Escrito íntegramente en primera persona, el otro autor, Samuel Sternberg, antiguo estudiante del laboratorio de Doudna, apenas hace acto de presencia.

En este contrarrelato, Doudna se muestra interesada desde siempre en la edición génica. Sus primeros trabajos giraron en torno a las enzimas del ARN, o ribozimas. Se labró un currículum impecable: obtuvo su tesis doctoral con Jack Szostak en Harvard, cursó una estancia de posdoctorado con Tom Cech en la Universidad de Colorado en Boulder y más tarde obtuvo una plaza en Yale. Desde mediados de los años noventa, relata la autora, estuvo estudiando los mecanismos moleculares básicos que «serían capaces de desatar todo el potencial de la edición de genes» [*véase* «El descubrimiento del sistema CRISPR-Cas», por Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros, *en este mismo número*].

Su trabajo sobre CRISPR se remonta a 2006 —seis años antes de que los artículos clave vieran la luz— con una llamada de la geomicrobióloga de Berkeley Jillian Banfield. Tomando café, esta le describió las cortas repeticiones palindrómicas agrupadas y separadas por intervalos regulares que aparecían sin cesar en sus bases de datos de ADN de bacterias y arqueas. Ubicuas como parecían ser en todos esos procariotas, cada una era sin embargo privativa de su especie. Al escuchar el descubrimiento, Doudna relata cómo «un leve escalofrío de intriga» le recorrió la espalda. Si CRISPR era algo tan generalizado, «había razones fundadas para pensar que la naturaleza lo usaría con un propósito importante». En 2012, ella y sus colaboradores habían logrado desentrañar el sistema natural CRISPR, se habían servido de él como herramienta de laboratorio y habían conseguido diseñar una versión modificada programable, barata y de fácil uso [*véase* «La edición genética, más precisa», por Margaret Knox; Investigación y Ciencia, febrero de 2015].

Las páginas centrales del libro desglosan la obligada y asombrosa lista de aplicaciones potenciales de la técnica, capaz de crear cualquier cosa, desde mosquitos sin malaria y perros policía con músculos como los de Vin Diesel hasta la cura definitiva del cáncer. Por fortuna, Doudna sabe poner el contrapunto a todo ese sensacionalismo con una relación seria de los riesgos y las responsabilidades que entrañan aplicaciones como la alteración del genoma de poblaciones enteras mediante genética dirigida [*véase* «Riesgos de la edición genética», por Jeantine Lunshof; Investigación y Ciencia, agosto de 2015]. En 2015 tuvo dudas de que CRISPR llegara a ser algún día lo bastante seguro como para emprender ensayos clínicos, pero ha acabado abrazando la edición de la línea germinal humana (la modificación heredable del ADN) una vez demostrada su seguridad [*véase* «Modificar nuestra herencia», por Stephen Hall; Investigación y Ciencia, noviembre de 2016].

Con todo, el análisis no acaba de convencer. Cuando llega el momento de abordar las cuestiones delicadas, como la experimentación con seres humanos, rehúsa hacerlo y comienza a desgranar una serie de preguntas retóricas. Antes que guiarnos a través de los espinosos dilemas éticos que plantea la ingeniería genética de precisión, o de ofrecernos una mirada franca, con todos sus defectos, de una de las grandes científicas de nuestra época, el libro se dedica sobre todo a ensalzar su imagen de «buena científica» y justifica el camino sin trabas que la evolución humana tomará por sí misma, con unos generosos márgenes de seguridad, eficacia y elección personal.

En lugar de disipar la sensación de estar leyendo sobre una batalla épica con caracteres cinematográficos, Doudna se recrea en ello. Se nos presenta como una persona tan inmaculada que parece querer ocultar algo en lugar de revelarlo. Deja a un lado la enconada disputa por las patentes calificándola como un «giro desconcertante» de la historia, aunque todo el mundo en la comunidad biomédica sabe que fue mucho más que eso. A medida que leía *A crack in creation* me venía a la cabeza «el hombre benévolo» de Benjamin Franklin, el cual «debe permitirse algunos defectos para no desconcertar a sus amigos» y —añadiría— para ganar en profundidad.

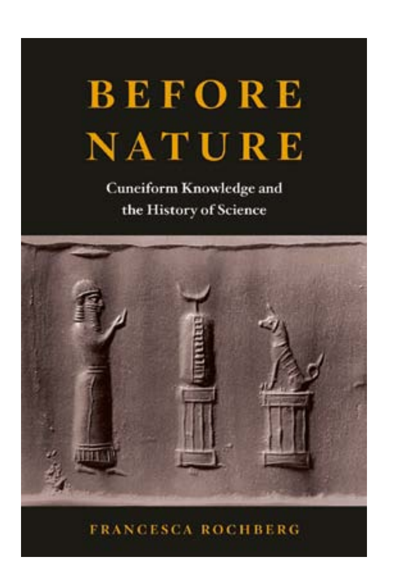
La narración sustituye a menudo el melodrama por tensión dramática. Una conferencia celebrada en Puerto Rico acaba con Charpentier y Doudna caminando por las callejas adoquinadas del Viejo San Juan, con Charpentier diciéndole seriamente: «Estoy segura de que si trabajáramos juntas podríamos descifrar la actividad [de la que acabaría siendo la enzima Cas]». «Sentí un escalofrío de emoción cuando vislumbré las posibilidades del proyecto», escribe. En su primer pulso con los dilemas éticos de la edición génica, sueña con un encuentro en el que Adolf Hitler le exige que desvele los secretos de la técnica. Por supuesto, se despierta sin angustia y decidida a que CRISPR no se destine nunca a fines perversos.

Sin duda, el principal propósito de *A crack in creation* es demostrar que Doudna es la auténtica heroína de CRISPR. Y en último término, a pesar de los defectos del libro, estoy convencido de que así es. Tanto los nominadores como el comité de los premios Nobel deberían leerlo. Ello no obstante, los entusiastas de CRISPR aún aguardamos un relato satisfactorio, perspicaz, franco y contextualizado.

—Nathaniel Comfort
Universidad Johns Hopkins
Baltimore, Maryland

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 546, págs. 30-32, 1 de junio de 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature



BEFORE NATURE
CUNEIFORM KNOWLEDGE
AND THE HISTORY OF SCIENCE
Francesca Rochberg
The University of Chicago Press, 2016

Antes de la ciencia

El carácter singular del conocimiento cuneiforme

Los antiguos babilonios merecen mayor reconocimiento que el que suelen concederles los manuales de historia de la ciencia. Es la tesis que Francesca Rochberg desarrolla en *Before nature*. El título evoca una colección de ensayos llamada *Before philosophy* y publicada por Henri Frankfort, H. A. Frankfort, John A. Wilson y Thorkild Jacobsen a mediados del siglo pasado. Desde un enfoque evolutivo de la relación entre mente y cultura, aquella obra se proponía acotar el estadio del desarrollo cognitivo de la civilización de Oriente Próximo y llegaba a la conclusión de que no alcanzaron una metodología científica rigurosa. Aquí Rochberg preferirá ensanchar el concepto de ciencia.

Cada período de la historia de la ciencia define un modo peculiar de relacionar la inquisición intelectual con la naturaleza circundante, objeto de investigación. De hecho, la naturaleza constituye la espina dorsal y el fundamento de la ciencia empírica. El concepto de naturaleza no solo va íntimamente ligado al método aplicado, sino que condiciona además la idea de ser humano.

En la historia de la ciencia europea descubrimos tres planteamientos principales sobre la forma de abordar la naturaleza, los cuales se suceden cronológicamente. Un primer enfoque, que dominó desde el comienzo de la ciencia en la Grecia clásica hasta el siglo XVII, ve en la naturaleza el principio activo de operación. Competía a la ciencia desentrañar la naturaleza para domeñarla y mejorar las artes prácticas. Se produjo el salto del mito a la razón, de las explicaciones alegóricas a las basadas en causas. Tras ese largo período sigue otro de consideración mecánica de la naturaleza. Dominó desde Galileo hasta finales del siglo XIX, con Newton como máximo teorizador. La concepción mecanicista de la naturaleza resaltaba el dualismo entre mente y materia; en determinados sectores se buscaba reducir el hombre a una máquina. Por fin, en la segunda mitad del siglo XIX apareció la naturaleza entendida como un proceso: el concepto evolucionista de la naturaleza afirmaba la unidad de esta en un proceso emergente del que el ser humano formaba parte, pero dejaba abierta la cuestión metacientífica de las causas finales.

¿Dónde encasillar los logros intelectuales del mundo cuneiforme? Decía Einstein en 1936 que el mayor misterio del mundo es que fuese inteligible. Que lo podamos comprender constituye un auténtico milagro. Esa inteligibilidad del mundo na-

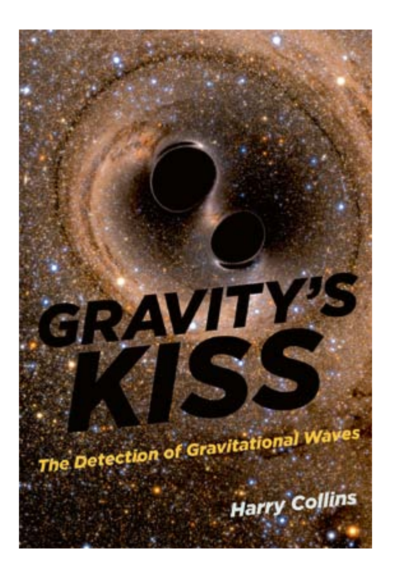
tural se hace más impresionante cuando consideramos que los supuestos humanos fundamentales sobre el tiempo y el espacio —la idea de que una hora consta de 60 minutos y que un círculo puede descomponerse en 360 grados— proceden de un tiempo en el que no existía un sentido articulado de la naturaleza, una referencia o palabra para ello. De esos conceptos se apropiaron los griegos de la Antigüedad clásica. Los tomaron de filósofos, matemáticos y astrónomos de la antigua Babilonia, cuyos cálculos sexagesimales aparecieron por vez primera en escritura cuneiforme, la más antigua del mundo, en el período arcaico de Babilonia, entre el 2000 y el 1600 antes de nuestra era.

A los escribas babilonios del tiempo en que los *physikoi* griegos comenzaron a explorar la materia y el movimiento no les acuciaba el interés de los filósofos occidentales por conocer la naturaleza o usarla de manera heurística. Su descripción de los cielos no estaba estructurada en una clasificación de la Luna y los planetas como objetos de la naturaleza, ni interpretaban sus apariciones cíclicas en términos de leyes físicas. Sus modelos astronómicos no dependían de un cosmos geométrico centrado en la Tierra ni estaban construidos para dar cuenta del movimiento planetario. A los asirobabilonios no les importaba tanto el movimiento de los cuerpos celestes cuanto la periodicidad. Las observaciones, predicciones y explicaciones astronómicas constituían las herramientas que los científicos empleaban para establecer correspondencias a través de muchas formas de relación y analogía entre lo superior (el firmamento) y lo inferior (el mundo terrestre), no solo con fines astrológicos, sino también médicos. La adivinación celeste, la astrología y la medicina astral se integraban entre los fines observacionales y predictivos de la astronomía.

La preocupación del mundo cuneiforme por la adivinación, el rito y los ensalmos vino motivada por la determinación de establecer normas y anomalías dentro de categorías significativas. Esa finalidad es, para Rochberg, genuinamente científica, quien aduce que lo mágico no debería emplearse como criterio para separar la ciencia de la no ciencia, porque en el mundo cuneiforme lo mágico no pertenecía a lo natural ni a lo sobrenatural. Los escribas cuneiformes consideraban la naturaleza como si observaran un conjunto de leyes; la propia observación de los fenómenos astrales entraña un compromiso con los fenómenos astronómicos. El énfasis del mundo cuneiforme en la adivinación celeste revela su coherencia con el pronóstico y la interpretación.

Recuerda, a este respecto, la crítica de Séneca a la adivinación etrusca: «Mientras nosotros creemos que el relámpago es liberado como resultado de la colisión de nubes, ellos creen que las nubes chocan para provocar el rayo», escribió el filósofo hispano en sus *Cuestiones naturales*. Los etruscos atribuían todas las cosas a los dioses, no creían que todas las cosas tuviesen un sentido al ocurrir, sino que acontecían porque debían tener un sentido. Toma por ejemplo el sacrificio ritual de animales cuyas entrañas se utilizaban para las predicciones. Seguían la regla de inferencia: «si *P*, entonces *Q*». Los vínculos no se limitaban a categorías empíricas; a menudo eran de naturaleza fonética o semántica. Loable esfuerzo el de Rochberg por dar cabida en el dominio de la ciencia a esas primeras aproximaciones racionales, aunque dependientes todavía de una cosmovisión mitológica.

—Luis Alonso



GRAVITY'S KISS
THE DETECTION OF GRAVITATIONAL WAVES
Harry Collins
The MIT Press, 2017

El descubrimiento de las ondas gravitacionales

Crónica de un hito científico

No es fácil determinar en nuestros días cuándo se produce un descubrimiento. Para unos puede ser cuando el instrumento adecuado registra un dato revelador; para otros, cuando el investigador repara en él al ordenar las estadísticas, es decir, cuando el científico sabe que tiene entre manos algo singular y novedoso. Vienen estas consideraciones de sociología de la ciencia a cuento del descubrimiento de las ondas gravitatorias, cuya primera detección fue anunciada el 11 de febrero de 2016. Sucedió en el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO). Harry Collins, que estuvo incardinado al proyecto durante 43 años, disecciona en *Gravity's kiss* el singular proceso de ese hallazgo. Predichas por la teoría de la relatividad general de Einstein, las ondas gravitatorias portan energía de la explosión de estrellas y otros procesos violentos, como las colisiones de agujeros negros.

El libro recrea los acontecimientos ocurridos durante los cinco meses que pasaron desde la detección hasta el anuncio. Collins estuvo en el centro de la noticia desde el momento del correo electrónico enviado la mañana del 14 de septiembre de 2015, que transmitía datos cruciales de los dos detectores de LIGO. A lo largo de las páginas, al lector se le van ofreciendo documentos inéditos que configuran un relato cabal de la excitación vivida [*véase* «La observación de ondas gravitacionales con LIGO», por Alicia Sintes y Borja Sorazu; Investigación y Ciencia, febrero de 2017].

El equipo que trabaja en el proyecto de detección de ondas gravitatorias reúne a más de mil investigadores, mayoritariamente de LIGO y del interferómetro Virgo, en Pisa. Ambas instituciones comparten datos y publican conjuntamente.

Pudieron registrar las ondas merced a los refinamientos acometidos en las instalaciones estadounidenses. A finales de 2010, los detectores se desactivaron para someterlos a mejoras técnicas que potenciasen su sensibilidad. Había que reforzarlos con un aislamiento sísmico avanzado, dotarlos de mejores espejos, compensación térmica y otros adelantos. Cada interferómetro consta de dos brazos de varios kilómetros de longitud dispuestos en ángulo recto. Al paso de una onda gravitatoria, un brazo se estrecha y el otro se alarga, lo que permite identificar el fenómeno.

En septiembre 2015 las dependencias de LIGO habían vuelto a entrar en funcionamiento después de cinco años de ajustes técnicos. Aquella primera detección se recibió con suma cautela. Además, muchos dudaban de que los instrumentos estuvieran capacitados para extraer del ruido ambiental unas señales que tenían que ser extraordinariamente sutiles. El equipo quería que su hallazgo se asentara sobre sólidas pruebas antes de darlo a conocer. Otros factores agregaron mayor tensión; por ejemplo, el tiempo. La llegada se había registrado durante una fase de pruebas tras el silencio de cinco años. La señal parecía reflejar los 0,2 segundos finales de la fusión de dos agujeros negros remotos, un hecho de rara fortuna. El secreto se mantuvo hasta que, el 25 de septiembre, el cosmólogo Lawrence Krauss, que no formaba parte del equipo, publicó en Twitter la existencia de rumores relativos a una posible detección.

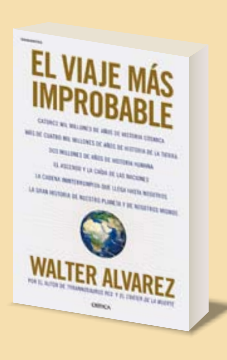
Muchos dudaban de que LIGO estuviera capacitado para observar unas señales que tenían que ser extraordinariamente sutiles

Tras haber viajado más de mil millones de años luz, aquellas ondas gravitatorias alcanzaron las dos instalaciones de LIGO, en Livingston y Hanford, a unos 3000 kilómetros de distancia. La concordancia entre ambas señales constituía una primera prueba de que correspondían a una detección fidedigna y no a ruido aleatorio. Los instrumentos habían observado una distorsión minúscula del espaciotiempo compatible con los modelos de colisión de dos agujeros negros. Según esos mismos modelos, los objetos tenían respectivamente 29 y 36 masas solares, y habrían dado lugar a un agujero negro con una masa 62 veces mayor que la del Sol. La diferencia, tres masas solares, se había convertido en energía, principalmente en forma de ondas gravitatorias. Los mismos análisis indicaban que la colisión había acontecido en una galaxia remota situada a unos 1300 millones de años luz.

Inmediatamente tras la detección, el equipo de LIGO alertó a otros observatorios astronómicos, como el de Cerro Tololo, en Chile, a fin de que explorasen el firmamento en busca de una señal visible que pudiese vincularse a la gravitatoria. No hubo éxito, pero el hito ya había abierto el camino a un nuevo dominio de la astrofísica. De ese modo, el descubrimiento de LIGO no solo supuso una verificación más de la teoría einsteiniana de la gravedad, sino también la constatación de que los astrónomos disponían de un nuevo instrumento para comprender el universo. El hallazgo ratificaba, además, la existencia de agujeros negros de tamaño medio.

—Luis Alonso

NOVEDADES



EL VIAJE MÁS IMPROBABLE
LA GRAN HISTORIA DE NUESTRO PLANETA Y DE NOSOTROS MISMOS
Walter Alvarez
Crítica, 2017
ISBN: 978-84-16771-99-8
296 págs. (21,90 €)



LA GRAN AVENTURA DEL CRISTAL
José Luis Amorós
Ediciones Complutense, 2017
ISBN: 978-84-669-3539-5
350 págs. (25 €)

LA ENGAÑOSA SENCILLEZ DE LOS TRIÁNGULOS
DE LA FÓRMULA DE HERÓN A LA CRIPTOGRAFÍA
Manuel de León y Ágata Timón
Libros de la Catarata, 2017
ISBN:978-84-9097-344-8
104 págs. (12 €)



MEDIO PLANETA
LA LUCHA POR LAS TIERRAS SALVAJES EN LA ERA DE LA SEXTA EXTINCIÓN
Edward O. Wilson
Errata Naturae, 2017
ISBN: 978-84-16544-47-9
320 págs. (19,50 €)



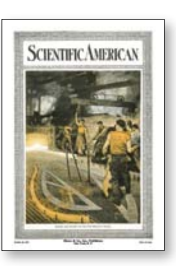
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Octubre 1967

Barrios de chabolas

«Se tiende a pensar que los ocupantes ilegales que pueblan los barrios de chabolas peruanos son indios procedentes de las montañas, incultos, indolentes, desorganizados, una carga económica para el país; y también que constituyen un grupo organizado de radicales que pretenden hacerse con las ciudades peruanas y someterlas al comunismo. Pero descubrí que en realidad las gentes de las barriadas alrededor de Lima en absoluto encajan en esa descripción. En su mayoría habían vivido en la ciudad algún tiempo (una media de nueve años), antes de mudarse a las afueras y organizarse en barriadas. Hablan español (aunque abunda el bilingüismo); su nivel educativo es ciertamente superior al de la población general del Perú. A primera vista, las barriadas parecen conjuntos informes de chozas de paja primitivas. Pero los asentamientos están trazados según planos, a menudo con el asesoramiento de estudiantes de arquitectura o ingeniería. Al paso del tiempo, la mayoría de las chozas son sustituidas por estructuras más estables.»



Octubre 1917

Energía volcánica

«En la Toscana central, en 1906, se empleó por primera vez el vapor de un volcán en un motor de vapor ordinario de unos cuarenta caballos de potencia, pero las sales de bórax y otras sustancias que las acompañaban corroyeron gravemente la maquinaria. Luego, aquel vapor recalentado se aplicó como combustible a una caldera multitubular. Una central experimental funcionó con buenos resultados, abasteciendo de energía a las industrias y pueblos cercanos a Lardarello. Su éxito movió al príncipe Ginori-Conti a desarrollar una central eléctrica a gran escala, y en 1916 se instalaron tres turbogeneradores de 3000 kilovatios. La nueva empresa ha conmocionado la industria de la Toscana, donde el actual precio de guerra del carbón varía entre 40 y 50 dólares la tonelada.»

Caballos de guerra

«Igual que tantas otras cosas, en esta guerra hallamos caballos y mulas en unos números nunca antes alcanzados. Como se ha visto necesario ejercer un mayor control de los recursos en todas las direcciones, ha sido esencial aprovechar de cada animal hasta la última gota de energía, que no se descarte definitivamente ninguna montura ni bestia de carga hasta que se hayan agotado todos los medios para salvarla. Como los caballos escasean, el jefe militar ya no puede matarlos de un tiro o por agotamiento, o prescindir de ellos en la calmosa confianza de que hay muchos más. Antes bien, debe conservarlos de todos los modos posibles, y así nace el hospital de campaña para caballos aquí ilustrado.»



1917: Asistencia médica a los caballos de guerra en el frente occidental.



Octubre 1867

Quinina para la malaria

«Entre las numerosas sustancias medicinales que la química orgánica nos ha facilitado, la quinina ocupa el primer puesto, el cloroformo el segundo. Sin la quinina, para los europeos serían inhabitables extensos territorios, incluso países enteros. La carestía de quinina en las islas Mauricio mostró a miles en qué poco puede convertirse cualquier posesión, incluido el oro, en comparación con esa salvífica sal. La busca de una quinina artificial, empero, ha resultado tan inútil como la de la piedra filosofal. Esta circunstancia ha inducido a algunos hombres de empresa a gestionar la introducción de quinos en la India, y las plantaciones indias de este árbol ya han prosperado tanto que ahora no caben miedos a que alguna vez falle el suministro de quinina.»

Cuidado con lo que se pide

«¿Por qué no ha de tener cada casa su cable telegráfico? Cuando el gas empezó a aplicase a la iluminación, se empleó solo en los edificios públicos y en las calles, e incluso ahora en el continente europeo se ha introducido en las viviendas privadas solo moderadamente. ¿Por qué no puede el cable telegráfico extenderse y difundirse como se ha hecho con las tuberías de gas? Imagínese una red de tales cables tendidos desde un punto central de la ciudad hasta la biblioteca o la sala de estar de cada vivienda, y un dispositivo que recogiera noticias similar al controlado por la asociación de la prensa. Mediante tales cables las noticias podrían ser comunicadas instantáneamente a cada familia. Un incendio, un asesinato, un disturbio, el resultado de unas elecciones serían conocidos de forma simultánea en todos los lugares de la ciudad. Desde luego, ello acabaría con los periódicos, pero ¿y qué? Las cosas pasan todas a la historia. ¿Por qué habría de ser una excepción algo tan efímero como los periódicos?»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVII, N.º 15, 13 DE OCTUBRE DE 1917

NÚMERO MONOGRÁFICO

CIENCIA, SEXO Y GÉNERO

EVOLUCIÓN
Falsos mitos sobre las diferencias entre hombres y mujeres
Por Cordelia Fine y Mark A. Elgar

GENÉTICA
El sexo más allá de los cromosomas
Por Amanda Montañez

NEUROCIENCIA
¿Existe un cerebro «femenino»?
Por Lydia Denworth

PSIQUIATRÍA
Estrés: diferencias entre hombres y mujeres
Por Debra A. Bangasser

PSICOLOGÍA
El desarrollo de los niños transgénero
Por Kristina R. Olson

SOCIOLOGÍA
La perspectiva de género en ciencia
Por Capitolina Díaz

SALUD
El sesgo de género en medicina
Por Marcia L. Stefanick

DESIGUALDAD
La desigualdad de género, un fenómeno mundial
Por Amanda Montañez

POLÍTICA
Hacia la igualdad de oportunidades para las mujeres
Por Ana L. Revenga y Ana María Muñoz Boudet

DEMOGRAFÍA
Adiós a las tradiciones que favorecen a los hijos varones
Por Monica Das Gupta

ECONOMÍA
La brecha de género en el mercado laboral
Por J. Ignacio Conde-Ruiz e Ignacio Marra

LIDERAZGO
Entrevista con Christiana Figueres, secretaria ejecutiva del Convenio de Cambio Climático de la ONU
Por Jen Schwartz

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

Difusión controlada

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes, Desplazar a las especies en peligro, El derecho a la libertad cognitiva y CRISPR: La pugna por la narrativa*; Juan M. González Mañas: *Edición genética de embriones humanos*; José Óscar Hernández Sendín: *Materiales reconfigurables inspirados en la papiroflexia y La movilidad del futuro*; Fabio Teixidó: *Comer hasta desecarnos, Fuentes de vida, Urbanismo sostenible y Aprovechar la basura*; Federico Fernández Gil: *Hablar consigo mismo*; Carlos Olalla: *Hacia la computación de energía cero*; Mercè Piqueras: *La nueva amenaza del carbunco*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España